UNTERSUCHUNGEN

ÜBER DIE

POLARISATION DES LICHTES IN TRÜBEN MEDIEN

UND DES

HIMMELSLICHTES MIT RÜCKSICHT AUF DIE ERKLÄRUNG DER BLAUEN FARBE DES HIMMELS

VON

J. M. PERNTER,

C. M. K. AKAD.

(VORGELEGT IN DER SITZUNG AM 11. JULI 1901.)

Die Rayleigh'sche Theorie der blauen Farbe des Himmels und der trüben Medien verlangt bekanntlich, dass sich die Intensitäten der verschiedenen im zerstreuten Himmelslicht enthaltenen Farben verkehrt verhalten wie die vierten Potenzen der Wellenlängen. Diese Forderung der Theorie wurde mehrmals der Prüfung unterzogen und dabei für das Himmelslicht mehrfache Abweichungen von der Rayleigh'schen Intensitätsformel $J = Ce^{-k\lambda^{-1}x}$ vorgefunden. Wenn diese Abweichungen auch schon aus Rayleigh's Theorie a priori vorausgesehen, ja gefordert werden mussten, so oft in der Luft eine größere Anzahl Theilchen schweben, welche größer als eine Lichtwellenlänge sind — und das wird unter den gewöhnlichen Verhältnissen wohl stets der Fall sein —, so hat doch diese eigentlich selbstverständliche Abweichung es verhindert, dass bisher eine tadellose Prüfung der Theorie durch die Beobachtung möglich wurde.

Es mag immerhin erreichbar sein, auf dem Wege der Intensitätsmessungen den Nachweis zu erbringen, dass das Himmelsblau die Farbe trüber Medien ist, am ehesten wohl dadurch, dass man auch in trüben Medien, bei verschiedener Abstufung von mehr weniger weißlichem Blau, das man durch eine Beimengung von größeren Theilchen in verschiedener Menge erhält, dieselben Abweichungen von dem Gesetze der vierten Potenz auftreten sieht, wie beim Himmelslichte. Da nun für die trüben Medien, wenn sie solche Beimengungen größerer Theilchen nicht besitzen, das Rayleigh'sche Gesetz für die Intensitäten der Farben nachgewiesen worden ist,[1] so folgt daraus, dass die Abweichungen, die beim Himmelslichte gefunden wurden, auf dieselben Ursachen zurückzuführen sind, wie die Abweichungen, die man bei den trüben Medien, mit Absicht, durch Versorgung mit größeren Theilchen hervorgerufen hat. Die Abweichungen vom Rayleigh'schen Gesetze in der Luft sind dann ebenso wie in den bekannten trüben Medien den Beimengungen größerer Theilchen zuzuschreiben, und ist daher die Luft wirklich ein mehr weniger verunreinigtes trübes Medium und ihre blaue Farbe die Farbe trüber Medien.

Es erschien aber auch ein zweiter Weg gangbar. Lord Rayleigh hat nicht nur den Beweis erbracht, dass in trüben Medien, deren trübende Theilchen kleiner sind als eine Wellenlänge, die Intensitäten der Farben sich verkehrt verhalten wie die vierten Potenzen ihrer Wellenlängen, sondern auch in einer jeden Zweifel ausschließenden Weise dargethan, dass in reinen trüben Medien das seitliche Licht senkrecht auf den einfallenden Strahl total polarisiert sein muss.[2] Dieser Winkel von 90 Grad, den Tyndall bei seinen Versuchen schon früher gefunden hatte und der für ihn die größte Schwierigkeit der Erklärung bildete, ist es gerade, welcher in der Theorie der trüben Medien von Rayleigh gefordert wird und seine Erklärung findet. Allerdings verlangt auch die von Hagenbach vertretene Ansicht über die blaue Farbe des Himmels einen Polarisationswinkel von nahe 90° (Maximum nahe 90° Abstand von der Sonne,) und es ist gewiss wichtig, die Hagenbach'sche Erklärung der blauen Farbe des Himmels in ernste Erwägung zu ziehen, da dieselbe gute physikalische Grundlagen besitzt. Es ergibt sich dabei aber das Resultat, dass die Hagenbach'schen Annahmen nicht hinreichen, um die Erscheinungen zu erklären.[3]

Es lag nun nahe, gerade die Polarisationserscheinungen in trüben Medien und am blauen Himmel einer näheren Vergleichung zu unterziehen, da schon ein so gewichtiges Moment für die Identität vorlag, nämlich die Übereinstimmung der Lage des Maximums der Polarisation senkrecht auf den primären Strahl bei den trüben Medien und beim Himmelslichte, dies umsomehr als die Intensitätsmessungen den größten Schwierigkeiten unterliegen und allzuvielen Fehlerquellen unterworfen sind.

Um diesen Plan durchzuführen, schien es angezeigt folgendermaßen vorzugehen. Es sollte zuerst untersucht werden, wie sich bei trüben Medien, welche nicht tadellos reine zu nennen sind, die Polarisation der einzelnen Farben verhält. In tadellos reinen trüben Medien verlangt Rayleigh's Theorie gleiche — für dünne Schichten totale — Polarisation für alle Farben. Weichen aber die trüben Medien von der Bedingung ab, dass sie lauter trübende Theilchen enthalten, die klein gegen eine Lichtwellenlänge sind, so entsteht die Frage, wie nun die Polarisation der einzelnen Farben sich verhält. A priori war zu vermuthen, dass nun Unterschiede in der Polarisation der Farben auftreten werden, welche von der Größe der »verunreinigenden« Theilchen abhängen müssten. Diesem Gedankengange entsprechend wurden zunächst die Versuche angeordnet.

Es wurden zu diesem Zwecke Mastixemulsionen in Wasser nach dem Vorgange Brücke's hergestellt. Durch mehr oder weniger Zusatz von alkoholischer, filtrierter Mastixlösung zu Wasser erhielt man Emulsionen, deren Farbe im seitlichen Lichte vom schönsten Blau bis zum milchig weißen Ton mit blauem Stiche abfielen — analog den Färbungen des blauen Himmels. Die Vorversuche wurden mit Sonnenlicht gemacht. Sie zeigten, dass je nach dem Grade der blauen Färbung die Polarisation von Roth, Grün u. Blau sich sehr eigenartig verschieden verhalte. Um nun zu entscheidend sicheren Resultaten zu kommen, war es nothwendig sich von dem Sonnenlichte, welches selbst dem Wechsel der atmosphärischen Verhältnisse unterworfen und bei der Reflexion vom Heliostaten nicht als tadellos unpolarisiert anzusehen war, unabhängig zu machen. Es wurde daher als Lichtquelle eine vorzügliche, sehr constante elektrische Bogenlampe benützt und die folgende Anordnung der Versuche getroffen.

Durch ein vor dem Linsensysteme der elektrischen Lampe aufgestelltes Diaphragma wurden die seitlichen Strahlen im Brennpunkte abgeblendet und durch geeignete Linsen die Centralstrahlen in ihrem weiteren Gange parallel gemacht. In etwa dritthalb Meter Entfernung von dem Diaphragma war der Trog mit dem trüben Medium angebracht. Dieser war bei der ersten Serie ein Glastrog von etwa zwei Decimeter Länge und einem Decimeter Höhe und Breite (bei den Vorversuchen war ein sehr viel kleinerer Trog verwendet worden), in der zweiten Serie aber ein Blechtrog, von etwas größeren Dimensionen, innen geschwärzt und vorne und rückwärts mit einem Fenster versehen, durch welches die directen Strahlen der Lichtquelle der Längsaxe entlang hindurchgehen konnten. Vor dem Troge stand ein Schirm mit einem etwas kleineren Ausschnitte als das Frontfenster des Troges. Endlich konnte hinter das Diaphragma ein Prismensatz à Vision directe gestellt werden. Auf dem genannten Schirme und rückwärts auf einer weißen Wandtafel konnte man die Partien des Spectrums erkennen, welche jeweilig durch das trübe Medium

geschickt wurden. Um die Polarisation des seitlichen Lichtes im trüben Medium senkrecht auf den direct durchgehenden Strahl zu beobachten, waren auch auf den Seiten des Troges einandergegenüber zwei Fenster angebracht. Das eine oder das andere konnte benützt werden, um ein Cornu'sches Photopolarimeter senkrecht auf den directen Strahl zu richten. Alle Polarisationsmessungen sowohl des Lichtes in den trüben Medien als des Himmelslichtes wurden mit diesem ausgezeichneten Polarimeter gemacht.

Nachdem die Mastixemulsion in den Trog gegossen war, versicherte man sich zunächst, dass das Strahlenbündel des directen Lichtes parallel sei und senkrecht auf die vordere Seite des Troges falle. Hierauf wurde das Polarimeter senkrecht auf das durchgehende Lichtbündel justiert und vor allem die Polarisationsebene bestimmt. Hierauf wurden in der Polarisationsebene und in der darauf senkrechten der Drehungswinkel des Nicol für die gleiche Helligkeit der beiden Felder im Polarimeter bestimmt, wobei anfänglich meist je vier und mehr, später und besonders bei Beobachtungen des Himmelslichtes, je zwei Einstellungen gemacht wurden. Der Sinus der Differenz der beiden Einstellungen gibt dann die Größe der Polarisation des untersuchten Lichtes.

Es wurde für jede Emulsion stets wenigstens ein Reihe gemacht, in welcher zuerst ein weißes, dann ein rothes, grünes, blaues oder violettes directes Strahlenbündel durch den Trog geschickt wurde, worauf meistens die Messung für weiß neuerlich gemacht wurde. In einer großen Anzahl von Fällen wurden noch mehr Farben untersucht, und liegen besonders für die Farbenreihe roth, gelb, grün, blau, violett eine größere Anzahl Messungen vor.

Da es sich zeigte, dass die Mastixemulsionen zwar recht lange Zeit ihre ursprünglichen blauen, beziehungsweise bläulichen und weißlichblauen Töne beibehalten, aber nach etwa 48 Stunden deutlich weißlicher wurden, so mussten dieselben wenigstens jeden zweiten Tag neu bereitet werden. Hiebei zeigte sich, dass es bei der Neubereitung der Emulsionen nicht gelingen wollte, absolute Gleichheit der Farbentöne bei gleicher percentueller Emulsion zu erzielen, wenn auch entsprechende Abstufungen in der Farbe stets gut zu erreichen waren. Dadurch war in den einzelnen Beobachtungsreihen ein gleichmäßiger Unterschied sichergestellt, und da jede in ähnlicher Weise verlief, kam das Wesen der Erscheinung bei jeder zum deutlichen Ausdruck.

Dies vorausgeschickt, ist es erlaubt, zur Mittheilung der Beobachtungsergebnisse überzugehen. Die definitiven Versuche begannen, nach Vorversuchen, am 5. April 1899. Die bei der ersten Versuchsreihe verwendeten Emulsionen waren nicht genau nach Maß hergestellt, sondern mehr nach dem Farbenton abgestimmt worden; sie mögen mit E_0, E_1, E_2, E_3, E_4 bezeichnet werden, wobei in Percent der Mastixlösung angenähert folgende Werte angenommen werden können: $E_0 = 0{\cdot}5\%$, $E_1 = 0{\cdot}75\%$, $E_2 = 1{\cdot}0\%$, $E_3 = 1{\cdot}5\%$, $E_4 = 2{\cdot}0\%$.

In den Tabellen sind alle Angaben ohne weiters verständlich; es sei nur bemerkt, dass die Größe der Polarisation durch den Buchstaben *R* ausgedrückt erscheint.

1. Versuchsreihe.

E	Weiß		Violett		Grün		Roth	
	$\omega_2-\omega_1$	*R*	$\omega_2-\omega_1$	*R*	$\omega_2-\omega_1$	*R*	$\omega_2-\omega_1$	*R*
E_0	63·1	0·8918	41·7	0·6652	56·7	0·8358	32·4	0·5358
E_1	61·0	0·8746	42·2	0·6717	55·6	0·8251	38·2	0·6184
E_2	54·1	0·8100	37·7	0·6115	52·2	0·7902	48·8	0·7524
E_3	49·0	0·7547	31·4	0·5210	45·4	0·7120	51·3	0·7804
E_4	44·4	0·6997	24·0	0·4067	43·3	0·6858	52·0	0·7880

Es wurden nun neue Emulsionen hergestellt und damit die folgende Versuchsreihe durchgeführt.

2. Versuchsreihe.

E	Weiß		Violett		Grün		Roth	
	$\omega_2-\omega_1$	R	$\omega_2-\omega_1$	R	$\omega_2-\omega_1$	R	$\omega_2-\omega_1$	R
4·0%	21·1	0·3600	—	—	—	—	—	—
2·0	48·1	0·7443	28·9	0·4833	46·8	0·7290	54·8	0·8171
1·0	58·5	0·8526	39·2	0·6320	47·5	0·7373	45·1	0·7083
0·5	66·7	0·9184	44·7	0·7034	57·5	0·8434	18·6	0·3190

Neuerlich wurden nun die Emulsionen frisch hergestellt und damit die folgende Versuchsreihe erhalten.

3. Versuchsreihe.

E	Weiß		Violett		Grün		Orangegelb		Roth	
	$\omega_2-\omega_1$	R	$\omega_2-\omega_1$	R	$\omega_2-\omega_1$	R	$\omega_2-\omega_1$	R	$\omega_2-\omega_1$	R
3·0%	47·0	0·7314	29·3	0·4894	34·4	0·5650	45·3	0·7108	57·8	0·8462
2·0	52·2	0·7902	40·7	0·6521	53·5	0·8039	55·7	0·8261	58·2	0·8499
1·0	65·2	0·9078	51·6	0·7837	59·1	0·8581	64·1	0·8996	52·5	0·7934
0·5	69·6	0·9373	52·6	0·7944	63·1	0·8918	63·1	0·8918	44·9	0·7059
0·25	72·0	0·9511	58·6	0·8536	68·3	0·9291	64·0	0·8988	32·7	0·5402

Mit denselben Emulsionen wurde vier Stunden später noch eine Versuchsreihe und eine dritte am Vormittag des nächsten Tages gemacht. Die Emulsionen waren ziemlich gut erhalten, aber doch im Tone etwas zurückgegangen.

4. Versuchsreihe.

E	Weiß		Violett		Grün		Orangegelb		Roth	
	$\omega_2-\omega_1$	R	$\omega_2-\omega_1$	R	$\omega_2-\omega_1$	R	$\omega_2-\omega_1$	R	$\omega_2-\omega_1$	R
2·0%	51·5	0·7826	33·0	0·5446	48·6	0·7501	55·3	0·8221	57·0	0·8387
1·0	62·2	0·8846	39·6	0·6374	59·7	0·8634	62·9	0·8902	55·7	0·8261
0·5	68·1	0·9278	38·0	0·6157	65·6	0·9107	64·8	0·9048	46·8	0·7290
0·25	67·5	0·9293	38·0	0·6157	63·6	0·8957	65·7	0·9114	43·2	0·6845

5. Versuchsreihe.

E	Weiß		Violett		Grün		Gelb		Roth	
	$\omega_2-\omega_1$	R	$\omega_2=\omega_1$	R	$\omega_2-\omega_1$	R	$\omega_2-\omega_1$	R	$\omega_2-\omega_1$	R
3·0%	47·3	0·7349	13·4	0·2317	38·6	0·6239	45·0	0·7071	51·1	0·7782
2·0	55·5	0·8241	21·7	0·3697	40·8	0·6534	48·7	0·7513	50·4	0·7705
1·0	57·2	0·8406	32·9	0·5432	56·5	0·8339	61·2	0·8763	46·2	0·7218
0·5	66·3	0·9157	42·4	0·6743	62·3	0·8854	64·8	0·9048	36·5	0·6225
0·25	71·5	0·9483	40·6	0·6508	67·2	0·9219	61·3	0·8771	22·5	0·3827

Im wesentlichen sind die Relsutate wohl dieselben, man bemerkt kaum eine kleine Veränderung im Sinne höherpercentiger Emulsionen.

Diese Versuchsreihen waren in den Osterferien 1899 durchgeführt worden. Die folgende Reihe fällt in die Weihnachtsferien 1899/1900. Es schien nämlich angezeigt, den Glastrog, der in den früheren Versuchen für die Aufnahme der Emulsionen benützt worden war, durch den oben beschriebenen innen geschwärzten Trog aus Blech zu ersetzen, um zu sehen, ob das von den Glaswänden etwa reflectierte Licht einen Einfluss auf die früher gewonnenen Resultate ausübte; es sollte also eine Controlversuchsreihe gemacht werden. Die neuen Emulsionen wurden mit großer Sorgfalt bereitet. Es ergaben sich die folgenden Resultate.

6. Versuchsreihe.

E	Weiß		Blau		Grün		Orangegelb		Roth	
	$\omega_2-\omega_1$	R	$\omega_2-\omega_1$	R	$\omega_2-\omega_1$	R	$\omega_2-\omega_1$	R	$\omega_2-\omega_1$	R
0·33%	66·2	0·9150	55·6	0·8251	62·2	0·8846	42·9	0·6807	26·4	0·4524
0·75	66·5	0·9171	54·9	0·8181	61·6	0·8788	46·9	0·7302	28·5	0·4772
1·0	62·8	0·8894	51·8	0·7859	61·1	0·8755	52·6	0·7944	30·1	0·5015
1·5	57·5	0·8434	51·2	0·7793	59·7	0·8634	54·3	0·8121	34·5	0·5664
2·0	54·6	0·8151	45·3	0·7108	57·0	0·8387	58·1	0·8490	35·8	0·5850
3·0	46·2	0·7218	30·5	0·5075	47·2	0·7337	50·8	0·7749	39·4	0·6347
4·0	41·2	0·6587	32·2	0·5329	44·1	0·6959	49·6	0·7615	49·0	0·7547

Es wurde bei dieser Reihe statt des Violett, das immer sehr lichtschwach ist, das Ende des Blau gewählt; Grün ist diesmal das eigentliche Grün, und so musste denn auch im Gelb ganz zum Roth und im Roth weit hinaus gegen das Ende des Spectrums gerückt werden.

Die einzelnen Versuchsreihen sind jede für sich zu nehmen, und es lassen sich aus den Polarisationswerten nirgends Mittelwerte bilden, da die Versuchsbedingungen immer nur für eine und dieselbe Reihe die gleichen waren. Die Emulsionen konnten nicht stets gleichartig hergestellt werden, die Auswahl der Farben aus dem Spectrum konnte auch nur auf angenäherte Gleichheit Anspruch machen. Der ganze Zweck und das Ziel der Untersuchung verlangte auch nicht die Herstellung einer solchen Gleichheit. Es war in erster Linie die Frage zu beantworten, ob die Polarisation der verschiedenen Farben gleich oder verschieden sei für jede Emulsion, und zweitens ob und wie sich für verschiedenpercentige Emulsionen, oder, mit anderen Worten, für die verschiedenen Abstufungen des Blaus der Emulsionen die Polarisation der verschiedenen Farben ändert.

Beginnen wir die Discussion der obigen Versuchsreihen nach dem Verhalten der Polarisation der Farben bei wachsenden »Concentrationen« der Emulsionen, das heißt bei immer weißlicher werdender Farbe derselben. Zu diesem Zwecke ordnen wir die Werte der Polarisation für die verschiedenen »Concentrationen« nach den Farben.

Weiß.

1. Reihe.

E_0	E_1	E_2	E_3	E_4
0.8918	0·8746	0·8100	0·7547	0·6997

2. Reihe.

0·5%	1·0%	2·0%	4·0%
0·9184	0·8520	0·7443	0·3600

3. Reihe.

0·25%	0·5%	1·0%	2·0%	3·0%
0·9511	0·9373	0·9078	0·7902	0·7314

4. Reihe.

0·25%	0·5%	1·0%	2·0%
0·9239	0·9278	0·8846	0·7826

5. Reihe.

0·25%	0·5%	1·0%	2·0%	3·0%
0·9483	0·9157	0·8406	0·8241	0·7349

6. Reihe.

0·33%	0·75%	1·00%	1·5%	2·0%	3·0%	4·0%
0·9150	0·9171	0·8894	0·8434	0·8151	0·7218	0·6587

Violett (Blau).

1. Reihe.

E_0	E_1	E_2	E_3	E_4
0·6662	0·6717	0·6115	0·5210	0·4067

2. Reihe.

0·5%	1·0%	2·0%	4·0%
0·7034	0·6320	0·4833	—

3. Reihe.

0·25%	0·5%	1·0%	2·0%	3·0%
0·8536	0·7944	0·7837	0·6521	0·4849

4. Reihe.

0·25%	0·5%	1·0%	2·0%
0·6157	0·6157	0·6374	0·5446

5. Reihe.

0·25%	0·5%	1·0%	2·0%	3·0%
0·6508	0·6743	0·5432	0·3679	0·2317

6. Reihe (Blau).

0·33%	0·75%	1·0%	1·5%	2·0%	3·0%	4·0%
0·8251	0·8181	0·7859	0·7793	0·7108	0·5075	0·5329

Grün (Blaugrün).

1. Reihe.

E_0	E_1	E_2	E_3	E_4
0·8358	0·8251	0·7902	0·7120	0·6858

2. Reihe.

0·5%	1·0%	2·0%	4·0%
0·8434	0·7373	0·7290	—

3. Reihe (Blaugrün).

0·25%	0·5%	1·0%	2·0%	3·0%
0·9291	0.8918	0·8581	0·8039	0·5650

4. Reihe (Blaugrün).

0·25%	0·5%	1·0%	2·0%
0·8957	0·9107	0·8034	0·7501

5. Reihe (Blaugrün).

0·25%	0·5%	1·0%	2·0%	3·0%
0·9219	0·8854	0·8339	0·6534	0·6239

6. Reihe.

0·33%	0·75%	1·00%	1·5%	2·0%	3·0%	4·0%
0·8840	0·8788	0·8755	0·8634	0·8387	0·7337	0·6959

Gelb (Orange).

3. Reihe.

0·25%	0·5%	1·0%	2·0%	3·0%
0·8988	0·8918	0·8990	0·8276	0·7108

4. Reihe.

0·25%	0·5%	1·0%	2·0%
0·9114	0·9048	0·8902	0·8221

5. Reihe.

0·25%	0·5%	1·0%	2·0%	3·0%
0·8771	0·9048	0·8763	0·7513	0·7071

6. Reihe (Orange).

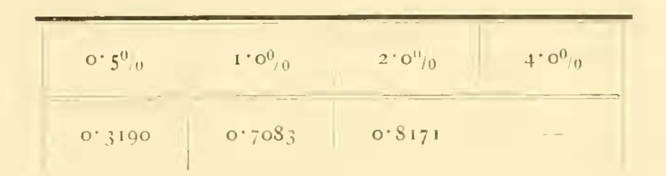
0·33%	0·75%	1·0%	1·5%	2·0%	3·0%	4·0%
0·6807	0·7302	0·7944	0·8121	0·8490	0·7749	0·7615

Roth.

1. Reihe.

E_0	E_1	E_2	E_3	E_4
0·5358	0·6184	0·7524	0·7804	0·7880

2. Reihe.



0·5%	1·0%	2·0%	4·0%
0·3190	0·7083	0·8171	—

3. Reihe.

0·25%	0·5%	1·0%	2·0%	3·0%
0.5402	0·7059	0·7934	0·8499	0·8462

4. Reihe.

0·25%	0·5%	1·0%	2·0%
0·6845	0·7290	0·8201	0·8387

5. Reihe.

0·25%	0·5%	1·0%	2·0%	3·0%
0·3827	0·6225	0·7218	0·7705	0·7782

6. Reihe.

0·33%	0·75%	1·0%	1·5%	2·0%	3·0%	4·0%
0·4524	0·4772	0·5015	0·5664	0·5850	0·6347	0·7547

Es ist zunächst aus der Tabelle für Weiß unzweifelbar ersichtlich, dass die Größe der Polarisation mit zunehmender »Concentration« abnimmt, dass also die Polarisation umso kleiner wird, je weißlicher

die Emulsionen sind. Um dies auch durch höher-percentige Emulsionen umfassende Beobachtungen festzustellen, wurde noch die folgende Versuchsreihe gemacht:

Weiß.

	0·33%	0·5%	0·75%	1·0%	1·5%	2·0%	3·0%	4·0%	6·0%	10·0%
$\omega_2 - \omega_1$	65·7	64·4	61·7	59·4	51·6	47·8	44·3	37·0	26·7	23·5
R	0·9114	0·9018	0·8805	0·8607	0·7837	0·7408	0·6984	0·6018	0·4493	0·3987

Es ist somit sichergestellt, dass die Polarisation mit der Anzahl der größeren Theilchen und der wachsenden Größe derselben abnimmt. Ganz dasselbe ist schon zum Theile von Arago und Anderen, sehr eingehend aber von Rubenson und vor einigen Jahren von Jensen für das Himmelsblau nachgewiesen worden.[5] Es sei nur noch besonders hervorgehoben, dass Jensen auch nachweisen konnte, dass das Tagesminimum der Polarisation in den ersten Nachmittagsstunden, also zur Zeit der größten, häufig für das Auge nicht leicht erkennbaren Trübungen durch Condensation des Wasserdampfes in der aufsteigenden Luft stattfindet, was Rubenson noch bezweifeln zu müssen glaubte. Wir können somit in erster Linie als feststehend ansehen, dass bei den trüben Medien und beim Himmelslichte die Größe der Polarisation von denselben Ursachen abhängig ist: Die Abwesenheit größerer Theilchen bringt die größten Polarisationswerte, die Anwesenheit größerer Theilchen eine umso stärkere Herabdrückung der Polarisation mit sich, je mehr und je größere derartige Theilchen beigemengt sind. Diese Erscheinung ist nur durch jene Theorie der trüben Medien zu erklären, welche die Farben- und Polarisationserscheinungen in denselben denjenigen Theilchen zuschreibt, welche kleiner als eine Lichtwellenlänge sind und die Lord Rayleigh gegeben hat.

Es sprechen somit schon zwei außerordentlich wichtige Punkte für die Rayleigh'sche Gleichstellung der trüben Medien mit der Luft bezüglich der Erklärung der blauen Farbe und der Polarisation: Die Übereinstimmung der Lage des Maximums der Polarisation (senkrecht auf die directen Strahlen) und die gleiche Ursache für die Unterschiede in der Größe der Polarisation; letztere ist umso größer, je weniger Theilchen größerer Art in beiden vorhanden sind.

Wir wollen nun die Discussion unserer Beobachtungen bezüglich des Verhaltens der Polarisation der einzelnen Farben fortsetzen. Betrachten wir zunächst nur das Verhalten der Polarisation jeder einzelnen Farbe zu der steigenden »Concentration« der Emulsionen. Es zeigt sich eine merkwürdige Erscheinung, der näher nachzugehen nothwendig sein wird. Die kurzwelligen Farben Violett und Blau, Blaugrün und Grün zeigen dasselbe Verhalten gegenüber der »Concentration« wie Weiß, das heißt stetige Abnahme der Polarisation für immer höherpercentige Emulsionen: während die langwellige rothe Farbe gerade das umgekehrte Verhalten zeigt. Gelb, und besonders Orange, scheint eine Mittelstellung einzunehmen, indem die Polarisation zuerst mit zunehmender »Concentration« zuzunehmen scheint, um dann bei noch höherpercentigen Emulsionen wie bei den kurzwelligen Farben abzunehmen. Dies ist eine zu auffallende Erscheinung, als dass sie so nebenher als richtig angenommen werden könnte. Es lag nahe, die Ursache derselben in den Versuchsanordnungen zu suchen. Da das Roth schon recht lichtschwach ist gegenüber dem Weiß und in den trüben Medien das seitliche Licht besonders geschwächt ist, so musste selbst ein geringer Theil weißen, im Experimentierraum zerstreuten unpolarisierten Lichtes der elektrischen Lampe, wenn er in das Polarimeter dringen konnte, den Einfluss haben, das polarisierte Roth zu überlagern und die Größe der Polarisation umsomehr herabzudrücken, je lichtschwächer das rothe polarisierte Licht ist. Letzteres ist nun in der That umso lichtschwächer, je niedrigerpercentig die Emulsion ist; das fällt bei den Beobachtungen sofort auf, und zwar dadurch, dass das Roth bei höherpercentigen Lösungen unerwartet lichtstark wird. Es war nun allerdings schon bei den obigen Versuchsreihen für die Abblendung des im Zimmer zerstreuten weißen Lichtes gesorgt worden, indem man den Trog mit einem

Deckel versah und mit Schirmen umstellte. Auch vor die elektrische Lampe waren entsprechend Schirme gestellt worden, und überdies wurde stets unter einem schwarzen Tuche beobachtet. Allein es schien nun angezeigt, den ganzen Trog mit einem schwarzen Tuche einzuhüllen, um so Controlreihen zu erhalten, welche sicher keinem Einflusse des zerstreuten äußeren Lichtes unterworfen waren.

Es ergaben sich jetzt die nachfolgenden Resultate:

A.

E	0·5%	1·0%	3·0%	6·0%
Weiß	0·9018	0·8607	0·6307	0·5314
Violett	0·7361	0·7254	0·4617	0·2232
Grün	0·8934	0·8746	0·6756	0·5255
Roth	0·7986	0·7705	0·7524	0·6613

B.

E	0·5%	1·0%	3·0%	6·0%
Weiß	0·9593	0·9385	0·8202	0·6626
Violett	0·8599	0·8599	0·6639	0·3955
Grün	0·9489	0·9403	0·7558	0·5678
Roth	0·9272	0·8934	0·8028	0·7600

Die obige Reihe *B.* wurde erhalten, indem senkrecht von oben das Polarimeter in die trüben Medien eingetaucht wurde, wobei zum Schutze des Inneren des Polarimeters vor der Flüssigkeit, sowie um correcte Resultate auch bei einer Neigung des Polarimeters zu erhalten, an die vordere Öffnung eine gut planparallele, schlierenfreie Glasplatte wasserdicht verkittet war. Wir kommen auf diese Versuche noch zurück, hier seien aber die unter 15° Neigung des Polarimeters gegen die Verticale gemachten Beobachtungen auch noch angeführt, da sie zur Beantwortung der eben aufgeworfenen Frage ebenfalls beitragen.

C.

E	0·5%	1·0%	3·0%	6·0%
Weiß	0·8786	0·8231	0·7547	0·6918
Violett	0·7912	0·7760	0·6401	0·3551
Grün	0·8443	0·8339	0·7022	0·5045
Roth	0·8261	0.7638	0·6717	0·4540

Es zeigt sich also, dass nur infolge eines für sehr schwaches Licht ungenügenden Ausschlusses des äußeren zerstreuten Lichtes die Polarisation im Roth den umgekehrten Gang der anderen Farben aufwies. Es bleibt aber dennoch ein sehr bemerkenswertes Resultat bestehen: Die Polarisation im Roth nimmt viel langsamer ab als in den anderen Farben, so dass dieselbe bei höherpercentigen Emulsionen schließlich im Roth am stärksten ist und gegen Violett hin abfällt. Für diesen Satz sind nicht nur die obigen Reihen *A.* und *B.* (*C.* kommt dabei nicht in Betracht, weil in Bezug auf das Verhältnis zu anderen Farben die Neigung des Polarimeters gegen das einfallende directe Lichtbündel von bedeutendem Einfluss ist), sondern soweit es die höherpercentigen Emulsionen betrifft, auch die ersten sechs Versuchsreihen, ja dieselben sind eigentlich für diesen Satz a fortiori beweisend. Wenn nämlich auch bei den höheren »Concentrationen«

noch das bisher zerstreute äußere Licht von Einfluss auf die gemessene Größe der Polarisation gewesen sein sollte, so könnte es nur herabdrückend und nicht vergrößernd wirken. Dabei muss auch bemerkt werden, dass die Lichtstärke des Grün stets, auch bei den höchsten »Concentrationen«, größer war als die des Roth, und auch das Blau war niemals übermäßig lichtschwach. Es kann daher das Übergewicht der Polarisation des Roth in diesen Fällen in keiner Weise auf Rechnung des schwachen, zerstreuten äußeren Lichtes gesetzt werden, wie dies übrigens auch die Controlreihen *A.* und *B.* zweifellos darthun. Zur besseren Übersicht über die Messungen bei höheren »Concentrationen« möge folgende Zusammenstellung dienen.

	Roth	Gelb (Orange)	Grün (Blaugrün)	Violett (Blau)	
E_3	0·7804	—	0·7120	0·5210	aus der 1. Versuchsreihe
E_1	0·7880	—	0·6858	0·4067	„ „ 1. „
0·0%	0·8171	—	0·7290	0·4833	aus der 2. Versuchsreihe
2·0%	0·8499	0·8201	0·8039	0·6521	aus der 3. Versuchsreihe
3·0	0·8462	0·7108	0·5650	0·4894	„ „ 3. „
2·0%	0·8387	0·8221	0·7511	0·5446	aus der 4. Versuchsreihe
2·0%	0·7705	0·7513	0·6534	0·3697	aus der 5. Versuchsreihe
3·0	0·7782	0·7071	0·6239	0·2317	„ „ 5. „
2·0%	(0·5850)	0·8490	0·8387	0·7108	aus der 6. Versuchsreihe
3·0	(0·6347)	0·7749	0·7337	0·5075	„ „ 6. „
4·0	(0·7547)	0·7615	0·6959	0·5329	„ „ 6. „
3·0%	0·7524	—	0·6756	0·6013	aus der Reihe *A.*
6·0	0·6613	—	0·5255	0·2232	„ „ „ „
3·0%	0·8028	—	0·7518	0·6639	aus der Reihe *B.*
6·0	0·7660	—	0·5678	0·3955	„ „ „ „

Hiezu ist zunächst nur zu bemerken, dass in der 6. Versuchsreihe das ganz ans Roth gerückte Orange die Rolle des Roth übernimmt, und das fast zum äußersten Roth hinausgeschobene Roth erst bei 4·0% sich dem Maximum nähert. Leider wurde versäumt, hier eine 6·0%ige Emulsion in den Versuch einzubeziehen; aus dem ganzen Gange ist aber leicht zu ersehen, dass bei 6·0% offenbar das fast äußerste Roth das Maximum übernommen hätte. Weiters sei der Vollständigkeit halber darauf hingewiesen, dass aus dem schon oben angegebenen Grunde die Reihe *C.* nicht in die Zusammenstellung mit inbegriffen werden konnte.

Das Eine steht nun aber fest, dass bei Emulsionen, welche schon als weißlich zu bezeichnen sind, wenn sie auch noch deutliches Blau haben, die Polarisation im Roth, bezw. Orange am stärksten, und je kurzwelliger die Farben sind, desto schwächer ist. Die Erklärung dieser Thatsache in der Rayleigh'schen Theorie der trüben Medien macht keine Schwierigkeiten.

Lord Rayleigh hat mit Zuhilfenahme eines von Stokes bewiesenen Satzes gezeigt, dass die vom directen Strahle getroffenen sehr kleinen Theilchen eine Strahlung aussenden, deren Schwingung gegeben ist durch:

$$\zeta = \left[a \frac{d'-d}{d} \frac{\pi V}{e \lambda^2} \sin \alpha \right] \cos^2 \frac{\pi}{\lambda} (vt-e).$$

Die Giltigkeit dieser Formel ist an die Bedingung geknüpft, dass die Theilchen der trüben Medien gegen die in Frage kommende Wellenlänge klein seien. Da in dieser Formel a die Amplitude des einfallenden Lichtes, d die ursprüngliche, d' die durch die Trübung veränderte Dichte, e die Entfernung des Auges vom störenden Punkte bedeutet, so ist leicht zu sehen, dass die Bedingung der Giltigkeit ins Verhältnis $V:\lambda^2$ eingegangen ist, wo V das Volumen des störenden Theilchens bedeutet. Drücken wir die Giltigkeitsbedingung aus durch $\rho^3 : \lambda^2 = \varepsilon$, wo ρ der Halbmesser des Theilchens ist, und ε eine kleine Zahl

bedeutet, die jedoch nicht größer werden darf als ein bestimmter oberer Wert ε_0. Sowie $\rho^3 : \lambda^2 > \varepsilon_0$ hört die Giltigkeit der obigen Schwingungsformel auf, und mit dem Aufhören dieser Giltigkeit hört auch die den trüben Medien eigenthümliche Polarisation auf.

Dies vorausgeschickt, ist es nun leicht zu überblicken, was im Lichte der Rayleigh'schen Theorie unser oben gefundenes Resultat bedeutet. Sendet man ein Strahlenbündel einer bestimmten Farbe durch das trübe Medium, so ist λ als eine bestimmte, constante Größe zu betrachten. In jeder Emulsion, d. h. in jedem trüben Medium, befinden sich aber sicherlich Theilchen verschiedenster Größe. Diejenigen Theilchen, welche der Bedingung genügen $\rho^3 : \lambda^2 \lesseqgtr \varepsilon_0$, werden die blaue Farbe und das Maximum der Polarisation unter dem Winkel von 90° erzeugen; alle Theilchen aber, bei denen ρ größer ist und daher $\rho^3 . \lambda^2 > \varepsilon_0$ wird, tragen hiezu nicht mehr bei, sondern stören die Reinheit der Erscheinung. Es ist nun klar, dass je größer die Wellenlänge, desto größer auch ρ sein kann, um noch ein Verhältnis von ρ^3 zu λ^2 zu geben, das unter dem Grenzwerte ε_0 bleibt. Daraus folgt unmittelbar, dass bei den höherpercentigen Emulsionen, die Theilchen, bei welchen der Wert von ε_0 überschritten ist, für die kurzwelligen Farben immer zahlreicher werden, während dieser Wert für die langwelligen Farben noch für eine große Anzahl von Theilchen nicht überschritten wird. So muss es kommen, dass die Polarisation im Gelb und Roth bei höherpercentigen Emulsionen sich größer erweist als im Grün und Blau. Es zeigt sich somit, dass die durch unsere Versuche für höherpercentige Emulsionen festgestellte Thatsache der größten Werte der Polarisation im Roth und immer kleinerer in den übrigen Farben als eine nothwendige Folgerung aus der Rayleigh'schen Theorie der trüben Medien sich ergibt.[6] Es besteht keine andere Theorie und lässt sich voraussichtlich auch keine aufstellen, welche diese Thatsache zu erklären vermöchte, unter gleichzeitiger Erklärung der auffallenden Erscheinung aus demselben Principe, dass die absoluten Werte der Polarisation für alle Farben, auch für das Roth größer werden, je kleiner die Theilchen sind.

Es war nun zu untersuchen, ob dieselbe Erscheinung unter den entsprechenden Verhältnissen auch beim zerstreuten Himmelslichte auftritt. Da begegnen wir zunächst einer unangenehmen Schwierigkeit. Wir sind in Bezug auf die Beurtheilung der Beimengung größerer Theilchen fast ganz auf das Auge angewiesen; je reiner und klarer die Luft und je blauer die Farbe des Himmels, desto geringer wird die Anzahl größerer »verunreinigender« Theilchen in der Luft sein. Es ist nun aber mit fast unüberwindlichen Schwierigkeiten verbunden durch die Schätzung der Farben des Himmels sich ein Urtheil zu bilden, welchen »Concentrations«graden der Mastixemulsionen gerade der bestimmte Zustand des Himmels entspricht; schon die große Helligkeit des Himmelslichtes macht den Vergleich unmöglich. Es erübrigt daher nichts anderes als bei für den Anblick mehr oder weniger weißlichem Himmel die Versuche auszuführen. Schön tiefblauer Himmel kam dabei wenig oder gar nicht in Betracht; es wäre in Wien auch schwerlich gelungen bei vollständig wolkenlosem Himmel jemals eine solche Farbe zu finden, da wir diese tiefblaue Farbe hier wohl nur zwischen Wolken zu sehen gewohnt sind. Da aber der störende Einfluss der Wolken unter jeder Bedingung auszuschließen war, so blieben eben nur blaue Töne zur Verfügung, wie sie uns bei wolkenlosem Himmel beschieden sind. Für den Zweck der Untersuchung reichte es aber hin, jene Unterschiede in der blauen Farbe des Himmels der Beobachtung zu unterziehen, welche leicht weißlich-blaue und stark weißlich-blaue Töne deutlich unterscheiden ließen. Wirkt die Atmosphäre als trübes Medium, so mussten sich in der Polarisation der einzelnen Farben dieselben relativen Verhältnisse ergeben wie bei den mäßig und stark »concentrierten« trüben Medien. Bei diesen Beobachtungen der Polarisation des Himmelslichtes für weißlich-blaue Töne hatte man aber mit einem störenden Umstande zu kämpfen, welchem schon Rubenson bei seinen Untersuchungen oft begegnete, selbst bei scheinbar tiefblauer Färbung. Rubenson machte wiederholt bei seinen Beobachtungen die Bemerkung, dass die Größe der Polarisation während der Messung plötzlich sich änderte. Diese Störungen treten bei weißlichen Tönen naturgemäß noch häufiger auf. Wenn es sich dann darum handelt die Größe der Polarisation für die einzelnen Farben im Verhältnis zu einander zu bestimmen, so sind alle solche Beobachtungsreihen mit wechselnder Größe der Polarisation nichtsbeweisend. Es waren dadurch zahlreiche Messungen unbrauchbar. Beispielshalber seien hier einige angeführt.

Vorerst möge aber die Methode der Beobachtung zur Mittheilung gelangen. Das Polarimeter wurde in Alt-Azimuth montiert, so dass die Lage des anvisierten Punktes gegen die Sonne stets festgestellt werden konnte. Zur Beobachtung der Farben wurden Sätze von rothen, grünen und blauen Gläsern, eigens passend gefasst, vorne in die Öffnung des Polarimeters eingeschoben. Von Roth wurden zwei, von Grün und Blau drei Gläser in einen Satz vereinigt. Die spectroskopische Untersuchung des von diesen Glassätzen durchgelassenen Lichtes ergab, wenn als Lichtquelle der blaue Himmel benützt wurde:

rother Glassatz: ein rothes Band um die Frauenhofer'sche Linie *C* bis gegen *B*.

grüner Glassatz: ein grünes Band zu beiden Seiten der Frauenhofer'sche Linie *E*.

blauer Glassatz: ein blaues Band von nahe der starken Eisenlinie im Blau bis *G*.

Wenn das Spectroskop, wie gesagt, gegen den blauen Himmel, auch ziemlich nahe an der Sonne, gerichtet war, sah man von anderen Farbentönen nichts, nur beim blauen Glassatz ahnte man einen Schimmer vom Anfang des Violett. Wurde das Spectroskop gegen die Sonne gerichtet, so sah man allerdings auch bei Grün und Blau sehr schwache Spuren benachbarter Farben. Da alle Beobachtungen an in weiter Entfernung von der Sonne liegenden Punkten des Himmels gemacht wurden, so können die oben angegebenen Farben als rein betrachtet werden. Es wurde jede Beobachtungsreihe mit Weiß begonnen, dann die Polarisation für Blau, Grün, Roth der Reihe nach gemessen, schließlich wieder mit Weiß beendet. Bei jeder Bestimmung wurden je zwei Einstellungen gemacht; zeigte es sich dabei, dass ein rascher Wechsel der Polarisation eintrat, so wurde die Messung sistiert, und wenn die Polarisation im Weiß vor und nach den Messungen mit den drei farbigen Glassätzen einen beträchtlichen Unterschied aufwies, so wurde diese Reihe als nicht beweiskräftig angesehen. Es mögen nun hier einige Beispiele solcher nicht beweiskräftiger Beobachtungsreihen Platz finden.

		Weiß	Roth	Grün	Blau	Weiß
1899	3. Juni a. m.	0·5000	0·5165	0·5314	0·5970	0·5821
„	4. „ „ „	0·4602	0·3811	0·4099	0·3891	0·4035
„	6. „ „ „	0·4802	0·3907	0·4179	0·4226	0·4115

Wie man sieht, differieren die Werte für Weiß vorher und nachher derart, dass eine Vergleichbarkeit der zwischenliegenden Messungen der Farben ausgeschlossen ist. Die brauchbaren Messungen, welche sehr nahe gleiche Werte im Weiß vor und nach den Messungen der Farben liefern, sollen nun so zusammengestellt werden, dass die Beobachtungen bei ziemlich blauem Himmel und die bei entschieden recht weißlichem Himmelsblau gesondert in zwei Gruppen angeführt werden. Die Beobachtungen vertheilen sich auf April und Juni 1899, Mai 1900 und Juni 1901. Wenn nichts anderes bemerkt, wurde im Vertical der Sonne auf den 90° von derselben abstehender Punkt eingestellt.

Polarisationsmessungen bei erträglich blauem Himmel.

	Weiß	Roth	Grün	Blau	Weiß	
4. April 1899 a. m.	0·0101	0·5962	0·6494	0·6032	0·6157	
10. „ „ „ „	0·3875	0·3239	0·4019	0·3605	0·3907	Punkt außerhalb des Vertical der Sonne
3. Juni 1899 „ „	0·5015	0·4695	0·5120	0·4555	0·5135	
6. » „ „ „	0·4368	0·3939	0·4802	0·4679	0·4289	im Vertikal der Sonne, aber etwas über 90° v. d. Sonne
22. Mai 1900 „ „	0·5835	0·5060	0·6320	0·6143	0·5878	
23. „ „ „ „	0·5505	0·4879	0·5962	0·5850	0·5592	nicht ganz im Vertical der Sonne, nahe 90° v. d. Sonne
23. „ „ „ „	0·1840	0·1633	0·2045	0·1132	0·1736	außer dem Vertical der Sonne, 49° von der Sonne
1. Juni 1901 „ „	0·5606	0·5000	0·5606	0·5225	0·5721	
2. „ „ „ „	0·5060	0·4772	0·5835	0·5490	0·5135	

Polarisationsmessungen bei stark weißlichem Himmel.

	Weiß	Roth	Grün	Blau	Weiß
4. Juni 1899 a. m.	0·3971	0·4258	0·3616	0·3338	0·3971
5. „ „ „ „	0·3584	0·3778	0·3616	0·3567	0·3535
5. „ „ „ „	0·3665	0·4051	0·3702	0·3437	0·3616
22. Mai 1900 p. m.	0·2790	0·2773	0·2072	0·2588	0·2840
24. „ „ „ „	0·1908	0·2521	0·1959	0·1426	0·1908

Die mannigfaltigsten ungünstigen Verhältnisse, besonders die Überbürdung mit anderweitiger Arbeiten, verhinderten mich alle günstigen Tage zu Polarisationsmessungen des Himmelslichtes zu benützen, obwohl die Anforderung eines wolkenlosen Himmels selten genug erfüllt wurde; die erhaltenen Resultate schienen aber so deutlich und entscheidend, dass der Zweck der Messungen offenbar erreicht war.

Vergleicht man nun die Resultate der polarimetrischen Messungen an trüben Medien und am Himmelslichte, so fällt sofort die volle Übereinstimmung im beiderseitigen Verhalten auf. Niedrigere »Concentrationen« und der »erträgliche« blaue Himmel zeigen für Grün höhere Werte der Polarisation als für Roth und Blau; höhere »Concentrationen« und ein stark weißlicher Himmel ergeben eine größere Polarisation im Roth als in den anderen Farben. Es hat also auch die Untersuchung der einzelnen Farben auf die Größe der Polarisation zu dem Ergebnisse geführt, dass die Luft sich ebenso verhält, wie die trüben Medien, dass also die Luft bezüglich der Lichtzerstreuung als trübes Medium anzusehen und die blaue Farbe des Himmels als das Blau trüber Medien anzusprechen ist.

Eine weitere Folgerung aus den Erwägungen über den Einfluss großer Theilchen auf die Polarisation der einzelnen Farben ist, dass auch die Verschiebung des Maximums der Polarisation bei gewissen »Concentrationen« für die einzelnen Farben verschieden sein werde. Schon Tyndall hat durch eine Reihe von Versuchen gezeigt, dass sich das Maximum der Polarisation immer mehr vom 90° Punkt gegen die Lichtquelle verschiebt, je größere und zahlreichere Theilchen in der Luft schweben. Rubenson hat dieselbe Erscheinung feststellen können. In der Rayleigh'schen Theorie ist sie selbstverständlich. Bei den Emulsionen, selbst der 6%igen, ist die Belastung und Verunreinigung nicht so groß, dass man beim weißen Lichte die Verschiebung des Maximums leicht feststellen kann. Er war aber leichter möglich, dass bei hohen Concentrationen sich in Bezug auf diese Verschiebung ein Unterschied im Verhalten der einzelnen Farben zeigen werde.

Es wurde nun die oben (Seite 11) beschriebene Anordnung getroffen, dass das Polarimeter senkrecht von oben auf das durch den Trog gehende Lichtbündel eingestellt oder aber gegen dasselbe geneigt werden konnte. Dass bei diesen Versuchen in ganz besonderer Weise vorgesorgt war jedes fremde, zerstreute Licht von Trog und Polarimeter abzuhalten, wurde schon erwähnt. Es zeigte sich nun, dass bei Emulsionen bis zu 1·5% ein ständiger Abfall der Polarisation mit wachsender Neigung gegen die Verticale auftritt. Die Messungen bei 3·0%iger und 6·0%iger Emulsion ergaben aber folgende Resultate:

Dreipercentige Emulsion.

Neigung	Weiß	Violett	Grün	Roth
0°	0·8802	0·6639	0·7558	0·8028
7°	0·7771	0·7466	0·7793	0·7547
15°	0·7547	0·6401	0·7022	0·6717

Sechspercentige Emulsion.

Neigung	Weiß	Violett	Grün	Roth
0°	0·6620	0·3955	0·5678	0·7660
7°	0·6101	0·4741	0·6184	0·6561
15°	0·6018	0·3551	0·5045	0·4540

Es zeigt sich also in der That die theoretische Voraussicht erfüllt: bei höherpercentigen Emulsionen liegt das Maximum der Polarisation für Roth noch bei 90° oder nahe daran, während es sich für Grün und Violett gegen 7° davon entfernt hat.

Leider war es unmöglich, dieselbe Erscheinung am Himmel nachzuweisen. Da nämlich gerade bei stark weißlichem Himmel die Veränderlichkeit der Polarisation eine große ist, müsste man drei Beobachter, deren persönliche Gleichung durch lange Versuchsreihen festgestellt ist, verwenden, welche gleichzeitig jeder bei den einzelnen Farben in verschiedenen Abständen vom 90° Punkt beobachtet. Dies ist schon eine fast undurchführbare Aufgabe. Da aber überdies beim Übergange von einer Farbe zur anderen für die Constanz der gleichen Verhältnisse wieder jede Controle fehlen würde, so wäre selbst durch diesen Aufwand von Instrumenten und Beobachtern und Mühen die gewünschte Sicherheit nicht geboten Es lässt sich daher nur das Eine sagen: Wenn Beobachtungen außerhalb des Verticals der Sonne oder im Vertical in anderen Abständen als 90° von der Sonne gemacht werden, so werden, falls ähnliche Verhältnisse sich ergeben wie bei den obigen Versuchen, dieselben im Lichte der Rayleigh'schen Theorie der trüben Medien zu erklären sein. Hieher gehören wahrscheinlich die Resultate folgender Messungen am Himmel:

	Weiß	Roth	Grün	Violett	Weiß	
3. Juni 1899 p. m.	0·4305	0·4220	0·4305	0·4580	0·4462	89° von der Sonne im Vertical der Sonne
5. „ „ „ „	0·5314	0·5000	0·5045	0·5195	0·5210	83° „ „ „ „ „ „ „
3. Juni 1901 a. m.	0·4741	0·3895	0·4115	0·4710	0·4617	80° „ „ „ „ „ „ „

Die feststehenden Thatsachen, dass erstens die Lage des Maximums der Polarisation, zweitens die Polarisationsgrößen bei verschiedenen Graden der »Verunreinigung« durch größere Theilchen, drittens das Verhalten der Polarisation der einzelnen Farben je nach dem Grade dieser »Verunreinigung« bei den trüben Medien und im Himmelslichte übereinstimmen, beweisen, abgesehen von jeder Theorie, dass die Luft als trübes Medium wirkt und daher auch die blaue Farbe des Himmels wie bei den trüben Medien zu erklären sein wird. Die Erklärung dieser Thatsachen aus den Principien der Optik gelingt glatt, einheitlich und vollkommen nur in der Rayleigh'schen Theorie der trüben Medien.

Wenn es nun gelungen ist, die obigen Thatsachen festzustellen und aus Rayleigh's Theorie zu erklären, so bleibt doch ein Punkt übrig, der noch der Erklärung harrt. Es ist dies die auffallende Erscheinung, dass bei den Emulsionen sowohl, welche schönes Blau zeigen, als bei gut und erträglich blauem Himmel, die Polarisation der einzelnen Farben eine eigenartige Verschiedenheit aufweist, indem hiebei stets Grün die stärkste Polarisation besitzt und sich fast durchwegs eine größere Polarisation im Blau als im Roth zeigt, wie dies letztere zuerst Piltschikoff für das Himmelslicht nachgewiesen hat (Piltschikoff: Sur la polarisation spectral du ciel. Compt. rend., tom. 115, p. 555, 1892). Die Erscheinung ist dem blauen Himmel und den trüben Medien gemeinsam, und beweist also neuerlich, dass das Himmelslicht als Licht trüber Medien aufzufassen ist. Ich sehe mich aber außer Stande, eine glatte Erklärung dieser Messungsresultate aus der Rayleigh'schen Theorie zu geben, und habe daher zunächst äußerlichen

Ursachen nachgeforscht. Die unmittelbar sich aufdrängende Idee, dass hier eine Beziehung zur Intensität der Farben sich zeige, indem der Leuchtkraft nach zuerst Grün, dann Blau und dann Roth kommt, musste einer eingehenden Untersuchung unterzogen werden.

Wenn die Größe der Polarisation aus was immer für einem Grunde von der Intensität des Lichtes abhängt, so muss durch Schwächung der Lichtquelle die Polarisation nicht nur in den einzelnen Farben, sondern auch im weißen Lichte abnehmen. Auf dieser Erwägung beruhen die folgenden Versuchsreihen mit trüben Medien, welche an zwei weit auseinanderliegenden Tagen durchgeführt wurden.

I. Reihe.

Weiß.

I	0·5%	1·0%	3·0%
1	0·9092	0·8271	0·6074
0·09	0·8829	0·8221	0·5990
0·045	0·8590	0·7815	0·5635

Violett.

I	0·5%	1·0%	3·0%
1	0·6909	0·4679	—
0·09	0·5990	0·4679	—
0·045	0·2470	0·2470	—

Grün.

I	0·5%	1·0%	3·0%
1	0·8599	0·7022	0·3404
0·09	0·8290	0·7133	0·3074
0·045	0·6858	0·5621	0·2504

Roth.

I	0·5%	1·0%	3·0%
1	0·7649	0·8080	0·5255
0·09	0·4863	0·7615	0·5299
0·045	0·0854	0·1771	0·1822

II. Reihe.

Weiß.

I	0·5%	1·0%	3·0%	6·0%
1	0·9092	0·8783	0·6984	0·5314
0·09	0·9078	0·8625	0·7349	0·5476
0·045	0·9063	0·8581	0·7501	0·5476

Violett.

I	0·5%	1·0%	3·0%	6·0%
1	0·7349	0·7133	0·4617	0·2232
0·25	0·6252	0·6639	0·4586	0·1616
0·09	0·4258	0·5635	0·4274	0·1392
0·045	—	—	0·3074	—

Grün.

I	0·5%	1·0%	3·0%	6·0%
1	0·8934	0·8712	0·6750	0·5255
0·25	0·8805	0·8704	0·6934	0·5090
0·09	0·8607	0·8368	0·7046	0·4985
0·045	0·7986	—	0·5835	0·4352

Roth.

I	0·5%	1·0%	3·0%	6·0%
1	0·7986	0·7705	0·7524	0·6613
0·25	0·6626	0·6508	0·6361	0·6534
0·09	0·4939	0·5314	0·5948	0·5821
0·045	—	—	—	0·4131

Hier bedeutet *I* die Intensität des ursprünglichen directen Lichtes. Sie wurde, wie bei den photographischen Apparaten üblich, mit »Blenden«, d. h. Diaphragmen verschieden großer Öffnung, verändert, indem mittels derselben vom Lichtkegel vor der Vereinigung im Brennpunkte Lichtbündel mit immer kleineren Querschnitten durchgelassen wurden. Die Emulsionen der ersten Reihe waren leider nicht gleichartig mit denen der zweiten Reihe. Ein weiterer Übelstand liegt in den Schwankungen der elektrischen Lampe. Die benützte Lampe war zweifellos die beste dieser Art und gab staunenswert constantes Licht;

die absolute Constanz, welche obige Messungen eigentlich erfordern würden, besaß sie aber dennoch nicht. Selbstverständlich wurde der Einfluss größerer, schon dem Auge erkenntlicher Schwenkungen dadurch unschädlich gemacht, dass bei Eintritt derselben die Messungen unterbrochen wurden. Trotzdem ist voraussichtlich eine Anzahl kleiner Schwankungen in der Lichtstärke der Lampe unbemerkt geblieben und daher in den obigen Messungen störend zur Geltung gekommen. Nichtsdestoweniger ist das Ergebnis der vorstehenden Versuchsreihen nicht misszuverstehen.

Man kann nicht umhin, die deutliche Sprache dieser Versuche zu verstehen; sie besagen, dass in der That, wenigstens für niedrige und mittlere »Concentrationen«, die Polarisationsgröße mit der Intensität der Lichtquelle abnimmt, zuerst wohl nur mäßig, bei größerer Abnahme der Intensität aber rapid. Es ist auch deutlich aus den gewonnenen Zahlen zu ersehen, dass die Unterschiede in der Größe der Polorisation der einzelnen Farben bei gutem und ziemlich gutem Blau sich vollständig auf die Unterschiede ihrer Intensität zurückführen lassen, sowohl in den trüben Medien als im Himmelslicht. Man beachte dabei, dass die Intensität 1 ziemlich genau die Intensität der Lichtquelle (elektrische Lampe) war, mit welcher alle früheren Messungen gemacht wurden. Es würden somit, falls die Intensitäten gleich wären, bei den niedrigen Emulsionen und »tiefblauen« reinem Himmel alle Farben dieselbe Größe der Polarisation besitzen; beim Übergange zu höheren Emulsionen würde dann nach den ausführlichen Erörterungen auf Seite 13 zuerst die Polarisation im Blau, bei höheren auch die im Grün stärker abnehmen müssen als die im Roth und so dann bei hohen »Concentrationen« die Erscheinung auftreten, die wir thatsächlich sowohl in den trüben Medien als auch im Himmelslichte bei den sehr weißlichen Thönen vorgefunden haben, dass die Polarisation im Roth am stärksten ist und bis Violett abnimmt.

Trotz dieser Klarstellung bezüglich des Einflusses der Helligkeit des zerstreuten seitlichen Lichtes, und somit der verschiedenen Helligkeit der Farben, oder vielmehr erst recht wegen und auf Grund dieser Klarstellung, wirft sich die Frage auf, wie dieser Einfluss der Helligkeit zu erklären sei. Die Antwort darauf ist nicht leicht, und ich fürchte, dass die im folgenden gegebene auch nicht ganz befriedigen wird. Es ist, soweit man nicht ganz besonders complicierte und vielleicht unwahrscheinliche Annahmen machen will, nicht möglich, diesen Einfluss der Helligkeit aus der Theorie der trüben Medien zu erklären.

Es dürfte aber eine, vielleicht nur theilweise befriedigende Erklärung in einer Erscheinung gefunden werden, welche bei trüben Medien sowohl flüssiger als gasförmiger Natur auftritt, und dies ist die Fluorescenz. Lallemand hat schon 1872, und später, 1889, sich ihm anschließend, Hartley[7] dieser Fluorescenz in erster Linie die blaue Farbe des Himmels zugeschrieben. Das ist zweifellos über das Ziel geschossen. Es fällt aber bei den Beobachtungen an den Mastixemulsionen, besonders bei schwacher Helligkeit, schon dem freien Auge auf, dass der eigenartige Lichtschimmer des Fluorescenzlichtes vorhanden ist. Dieses Fluorescenzlicht ist aber unpolarisiert und vermengt sich bei den Messungen mit dem polarisierten Lichte. Es ist daher eine wohlbegründete Annahme, dass die Überlagerung mit Fluorescenzlicht die Polarisationsgröße des Gesammtlichtes umsomehr herabdrücken muss, je schwächer die Helligkeit des regelmäßig zerstreuten Lichtes trüber Medien ist. Damit wären dann die in Frage stehenden Unterschiede der Polarisation in Roth, Grün und Blau bei gut und ziemlich blauen Tönen aufgeklärt. Ich verkenne nicht, dass eine gewisse Unbefriedigtheit immerhin zurückbleibt; es müssten eigentlich eingehende Versuche zur Feststellung der Größe des Einflusses der Fluorescenz durchgeführt werden. Dazu mangelt mir aber augenblicklich die Zeit. Sollte sich durch derartige Versuche herausstellen, dass die Fluorescenz nicht hinreicht die fraglichen Unterschiede zu erklären, so wüsste ich nicht die betreffenden Thatsachen glatt zu deuten; man könnte dann vielleicht zur Annahme greifen, dass bei bestimmten Farbentönen die für eine Farbe eben noch günstige Größe der Theilchen in überwiegender Anzahl vorhanden sei, wofür sich bei den Wolkenbildungen Tyndall's und dem Dampfstrahle von Bock Anhaltspunkte finden ließen.[1] Bezüglich der Zurückführung der Erscheinungen des Himmelslichtes auf die trüben Medien ist aber jedenfalls schon die Thatsache des gleichen Verhaltens in allen diesen Einzelnheiten entscheidend.

[1] Siehe Anmerkung 6.

Zusammenfassung.

Damit kann diese Untersuchung als abgeschlossen angesehen werden.

Sie hatte sich zur Aufgabe gestellt, die eigenartige Lichzerstreuung in den trüben Medien durch Messung der Polarisation des zerstreuten Lichtes zu verfolgen. Es sollte untersucht werden, wie die Polarisation sich ändert mit der wachsenden Weißlichkeit des seitlichen blauen Lichtes der trüben Medien, und wie sich die Polarisation der einzelnen Farben zu einander und gegenüber den verschieden abgestuften trüben Medien verhält. Dieselben Untersuchungen sollten auch bezüglich des blauen Himmelslichtes bei verschiedenen Abstufungen des Himmelsblaus durchgeführt werden, und aus dem Vergleiche der Ergebnisse sollte die Frage sich beantworten, ob das Himmelsblau auch durch das Verhalten der Polarisation der Farben als Blau trüber Medien sich erweist oder nicht.

Es ergab sich:

1. Das von den trüben Medien seitlich ausgesandte Licht ist umso weniger polarisiert, je weißiicher das Blau derselben ist.

Für das Himmelslicht war dieser Satz schon früher nachgewiesen, bewahrheitete sich aber auch in unseren diesbezüglichen Versuchen.

2. Die Polarisation der Farben im seitlichen Lichte trüber Medien ergab, dass dieselbe für Roth, Grün Blau fast durchaus verschieden groß ist, und zwar für gute und ziemlich blaue Töne des seitlichen Lichtes so, dass im Grün die größte, im Roth fast durchwegs die kleinste, im Blau eine zwischen Grün und Roth liegende Polarisation auftritt. Bei stark weißlichen Tönen des seitlichen Lichtes der trüben Medien verschieben sich diese Verhältnisse; es tritt nun die größte Polarisation im Roth auf und wird mit abnehmender Wellenlänge der Farbe immer kleiner.

Ganz dasselbe Verhalten der Polarisation der einzelnen Farben konnte beim Himmelslichte nachgewiesen werden; auch hier ergab sich, dass bei ziemlich blauem Himmel die größte Polarisation auf Grün fällt, während Roth und Blau geringere Polarisation aufweisen, wobei fast durchwegs die Polarisation im Blau die im Roth übertrifft. Ebenso zeigte es sich, dass bei stark weißlichem Himmel die größte Polarisation im Roth liegt und dieselbe bis zum Blau stetig abnimmt.

Durch dieses gleichartige Verhalten der Polarisation der trüben Medien und des Himmelslichtes in beiden obigen Punkten ist, abgesehen von jeder Theorie, bewiesen, dass die Lichtzerstreuung im Himmelslichte dieselbe ist wie in trüben Medien, dass also die Luft als trübes Medium anzusehen und die blaue Farbe des Himmels als die Farbe eines trüben Mediums im seitlichen Lichte anzusprechen ist.

3. Die unter 1. und 2. festgestellten Thatsachen finden in Lord Rayleigh's Theorie der trüben Medien und des Himmelsblaus ihre Erklärung. Da die Schönheit der blauen Farbe bei trüben Medien davon abhängt, dass womöglich keine oder möglichst wenige trübende Theilchen von der Größe einer Wellenlänge oder gar darüber vorkommen, und nach eben dieser Theorie dieses Blau umso weißlicher sein wird, je mehr größere Theilchen im trüben Medium sich befinden — und ebenso die Polarisation des seitlichen Lichtes, deren Maximum in der Richtung senkrecht auf das in das trübe Medium eindringende directe Lichtbündel liegt, um so vollkommener sein muss, je freier von größeren Theilchen und um so unvollkommener je belasteter mit größeren Theilchen das trübe Medium ist, so ist damit die Thatsache erklärt, dass sowohl in den trüben Medien als im Himmelslicht die Polarisation umso kleiner wird, je weißlicher das seitlich zerstreute Licht ist.

Da ferner nach derselben Theorie, die den trüben Medien eigenartige Polarisation davon abhängt, dass das Verhältnis der Größe der trübenden Theilchen zur Wellenlänge einen kleinen, nicht zu überschreitenden Wert besitze, so ist es ohneweiters klar, dass bei etwas größeren Theilchen dieser Wert für Blau schon überschritten, während er für Roth noch nicht erreicht ist. In trüben Medien weißlichen Tones werden nun im Blau nur mehr die kleinsten Theilchen; diese kleinsten und dazu noch etwas größere Theilchen im Grün; diese und überdies noch etwas größere Theilchen im Roth im Sinne der trüben

Medien polarisiertes Licht aussenden. Es wird daher die Polarisation im Roth ihr Maximum, im Blau, eigentlich im Violett, ihr Minimum haben, wie es die Messungen ergaben.

Was den Unterschied der Polarisation der Farben bei gut und ziemlich gut blauen Tönen der trüben Medien und des Himmelslichtes, besonders die Herabdrückung der Polarisation im Roth unter der im Blau betrifft, so versuchten wir diese Erscheinung durch das in trüben Medien auftretende Fluorescenzlicht zu erklären. Die Schwäche der Leuchtkraft im Blau und besonders im Roth bei den gut und ziemlich blauen trüben Medien ist auffallend, und die Überlagerung dieses polarisierten Lichtes durch nicht polarisiertes Fluorescenzlicht wird für das Gesammtlicht eine umso stärkere Herabdrückung der Polarisation bewirken, je geringer die Leuchtkraft des polarisierten Lichtes ist. Ich empfinde wohl, dass eine Befriedigung durch diesen Erklärungsversuch nicht gewährt wird. Sollte es sich zeigen, dass er ungenügend ist, so werden neue Versuche nothwendig, um eine breitere Grundlage zur Erklärung dieser Erscheinung zu finden, wobei wohl in erster Linie die Frage des Vorhandenseins eines Maximums von für eine bestimmte Farbe günstigter Größe der Theilchen in Betracht käme. Bezüglich der Rückführung der Farbe und Polarisation des Himmelslichtes auf trübe Medien wird hiedurch aber nichts geändert, da die Erscheinung bei beiden gleichmäßig auftritt.

Ich bin bei dieser Untersuchung von der Idee ausgegangen, dass die Frage, ob das Himmelslicht als zerstreutes Licht eines trüben Mediums und das Himmelsblau als Farbe eines trüen Mediums aufzufassen sei, durch das Verhalten des Lichtes in Bezug auf die Polarisation leichter und vielleicht auch entscheidender beantwortet werden kann als durch Messungen der Intensität der einzelnen Farben, da die letzteren sowohl bei künstlichen trüben Medien als beim Himmelslichte mit großen experimentellen Schwierigkeiten verbunden sind. Es hat sich gezeigt, dass der eingeschlagene Weg gut gewählt war und zum Ziele führte.

Obwohl nun hier nicht der Platz ist, eine zusammenfassende Darstellung aller Beweise für die Richtigkeit der Rayleigh'schen Theorie der blauen Farbe des Himmels zu geben — ich werde bald Gelegenheit haben, dies am geeigneten Orte zu thun —, so wird es doch angezeigt erscheinen, die aus den Polarisationserscheinungen gewonnenen Argumente für diese Theorie kurz zusammenzufassen.

Diese sind:

1. Die Lage des Maximums der Polarisation in der Richtung senkrecht auf die einfallenden Strahlen, beziehungsweise in 90° Abstand von der Sonne. Dies findet seine Erklärung nur in der Rayleigh'schen Theorie.

In den trüben Medien konnte die Unabhängigkeit dieses Winkels von der Substanz der trübenden Theilchen, also auch ihrer Berechnungsexponenten mit aller Sicherheit nachgewiesen wurden; in der Atmosphäre sind auch verschiedenartige trübende Theilchen vorhanden. Nur in Rayleigh's Theorie ist die Unabhängigkeit dieses Winkels von der Substanz der Theilchen erklärbar.

2. Die Abhängigkeit der Größe dieses Maximums von der Anzahl und Größe jener Theilchen, welche als eine »Verunreinigung« des trüben Mediums, beziehungsweise der Luft sich erweisen, weil infolge ihrer Größe eine wirkliche Reflexion des Lichtes an ihnen stattfindet; dadurch wird die den reinen trüben Medien eigenartige, durch Theilchen, welche kleiner sind als eine Lichtwellenlänge, erzeugte Polarisation gestört und umsomehr herabgedrückt, je mehr Theilchen eigentlich reflectiertes Licht verbreiten. Auch diese Erscheinung läßt sich nur in der Rayleigh'schen Theorie voll und zwanglos erklären.

3. Die Erscheinung, dass bei stark weißlichem Farbentone der trüben Medien und des Himmelslichtes die Polarisation der rothen Farbe von allen übrigen Farben die größte ist, während dieselbe gegen das Violett zu immer kleiner wird. Nur in der Rayleigh'schen Theorie findet sich dafür die naturgemäße und ganze Erklärung.

4. Die Thatsache, dass die Polarisationsebene auch für das secundär zerstreute Licht der Luft, welche ganz im Schatten liegt und von keinem directen Sonnenstrahl getroffen wird, ebenfalls mit der durch die Visierlinie und die Sonne bestimmten Ebene zusammenfällt, wie für die vom directen Sonnenlichte erleuchtete Luft, und dass auch für diese secundäre Lichtzerstreuung das Maximum der Polarisation

in der Richtung senkrecht auf die Verbindungslinie Sonne-anvisierter Punkt fällt. Diese scheinbar so eigenthümlichen Thatsachen hat J. L. Soret als eine nothwendige Folgerung aus der Rayleigh's Theorie beweisen können.

5. Die Existenz der sogenannten neutralen Punkte und die Umkehrung der Polarisation zwischen denselben und der Sonne, beziehungsweise dem Gegenpunkte der Sonne, war wohl die räthselhafteste der Polarisationserscheinungen des Himmelslichtes. Dieselbe wurde wiederum von J. L. Soret als nothwendige Folgerung aus der Rayleigh'schen Theorie für die als Kugelabschnitt über dem Beobachtungsorte befindliche Atmosphäre abgeleitet.

Hienach erscheint der Schluss gerechtfertigt, dass die Polarisationserscheinungen den vollen Beweis dafür erbringen, dass die Atmosphäre als bald weniger, bald mehr »verunreigtes« trübes Medium auf die eindringenden Sonnenstrahlen wirkt, und dass daher auch die blaue Farbe des Himmels wesentlich das Blau trüber Medien ist.

Anmerkung 1. Wenn es sich um die Untersuchung handelt, ob das theoretische Gesetz von Rayleigh durch die Messungen der Intensität des von trüben Medien durchgelassenen oder von ihnen seitlich zerstreuten Lichtes bewahrheitet wird, so muss stets vor Augen gehalten werden, dass dieses Gesetz nur für solche trübe Medien abgeleitet wurde und Giltigkeit haben kann, welche den Varaussetzungen der Ableitung entsprechen. Die wichtigste Voraussetzung ist nun die, dass die trübenden Theilchen klein seien gegen eine Wellenlänge. In einer letzten Abhandlung über diesen Gegenstand: On the transmission of light through an Atmosphere containig small particles in suspension and on the origin of the bleue of the sky; Philos. Magaz. 5. ser. 1899, vol. 47, p. 375 thut Rayleigh dar, dass auch schon die Luftmolecüle das Himmelsblau erzeugen würden. Wir wollen die trüben Medien, welche dieser Bedingung voll entsprechen, welche also nur solche trübende Theilchen enthalten, welche gegen eine Wellenlänge klein sind, ideale oder reine trübe Medien nennen. Da das Mikroskop bezüglich so kleiner Körperchen versagt, ist es nicht möglich, durch Messungen die Größe dieser Theilchen festzustellen; nur ein negatives Resultat, das heißt, die Nichtsichtbarkeit von trübenden Theilchen lässt sich gewinnen. Freilich dürfte es zweifelhaft sein, ob in einem anderen Falle als etwa in den Tyndall'schen Wölkchen in statu nascendi diese Bedingung jemals rein zu erfüllen ist. Die Messung der Größe der trübenden Theilchen unter dem Mikroskope versagt aber auch dann noch, wenn dieselben schon an die Lichtwellenlänge heranreicht, und es ist daher für die Beurtheilung der Idealität und Reinheit eines trüben Mediums ein anderes Kriterium zu suchen. Ein solches liegt nun in der von der Theorie geforderten und durch die Beobachtung festgestellten Thatsache, dass das seitlich zerstreute Licht truber Medien blau ist. Die Reinheit und der Ton dieses Blau erlauben einen Schluss auf die Reinheit des trüben Mediums. Leider kann man nicht behaupten, dass dieser Farbenton einer exacten Messung zugänglich sei, doch ist es immerhin zu erreichen, dass man nach den Abstufungen dieses Blau, das immer weißlicher wird, je mehr größere Theilchen vorhanden sind, welche der obigen Grundbedingung nicht entsprechen, und besonders je mehr Theilchen vorhanden sind, deren Größe durch das Mikroskop feststellbar ist, die Reinheit des trüben Mediums beurtheilen kann. Theilchen von der Größe einer Wellenlänge und darüber, oder, wie wir uns genauer nach den optischen Gesetzen ausdrücken wollen, Theilchen, deren Oberfläche eine Ausdehnung bietet, welche mehr als ein Paar Wellenlängen beträgt, werden auf die Lichtzerstreuung nicht mehr nach dem Rayleigh'schen Gesetze, sondern schlechtweg nach den gewöhnlichen Reflexionsgesetzen wirken. Wir haben durch diese Feststellungen zweierlei Lichtzerstreuung in trüben Medien zu erwarten: In idealen trüben Medien einzig die nach Rayleigh's Theorie geforderte, in »trüben Medien«, welche durch Theilchen von der Größe einer Wellenlänge und darüber getrübt sind, auch eine solche nach den gewöhlichen Reflexionsgesetzen. Die idealen trüben Medien werden daher in ihrer Lichtzerstreuung dem Gesetze gehorchen: $\lambda^4 \log (I_0 - I) = C$, die uneigentlichen trüben Medien aber dem Gesetze: $\lambda^2 \log (I_0 - I') = C'$. Da, wie gesagt, rein ideale trübe Medien gewiss zu den äußersten Seltenheiten gehören und auch die Luft nie ein solches ideales trübes Medium sein wird, so ist von vorneherein klar, dass in fast allen Fällen die Lichtzerstreung gleichzeitig von den entsprechend kleinen Theilchen nach dem Rayleigh'schen Gesetze und von den entsprechend größeren Theilchen nach dem gewöhnlichen Reflexionsgesetze vor sich gehen wird, wo es dann von dem Verhältnis der Anzahl der Theilchen der einen und der anderen Gruppe abhängen wird, welches Resultat die Summe $\lambda^4 \log (I_0 - I) + \lambda^2 \log (I_0 - I')$ ergeben wird. Ich muss aber hier auf eine Discontinuitat hinweisen, welche bezüglich der Größe der Theilchen obwaltet. Die beiden theoretisch festlegbaren Arten der Zerstreuung treffen jede für sich eine bestimmte Auswahl zwischen den Theilchen: die eine verlangt Theilchen, die gegen eine Lichtwellenlänge klein sind, die andere solche, deren Oberfläche groß genug ist, um auf der reflectierenden Seite eine Ausdehnung von einem mehrfachen Vielfachen einer Lichtwellenlänge darzubieten, was erst eintritt, wenn die Theilchen größer sind als eine Wellenlänge. Für jene Theilchen, welche sich etwa der Größe einer Wellenlänge nähern, die also nicht mehr zur ersten Gruppe gehören, aber auch noch nicht in die zweite Gruppe sich einreihen, gilt weder das eine noch das andere der beiden obigen Gesetze. Für diese zwischenliegende Theilchengruppe muss also das Gesetz, nach welchem sie die Lichtzerstreuung bewirkt, erst ermittelt werden. Es scheint nun, als ob dieses Gesetz experimentell von Compan (Compt. rend. tom. 128, p. 1229) gefunden sein könnte. Er untersuchte die verschiedensten trüben Medien, feste und flüssige, und zwar sowohl im möglichst reinen und im depravierten Zustande. Er konnte feststellen, dass

für die festen trüben Medien. Niederschlag von Ruß, Magnesia etc., sowie die entsprechenden flüssigen trüben Medien schlechtweg das gewöhnliche Reflexionsgesetz gilt, während für flüssige trübe Medien, die mit geringen Mengen von Silberchlorür oder alkoholischer Mastixlösung hergestellt sind, sich das Rayleigh'sche Gesetz bewahrheitet. Die uns bekannten Zerstreuungsgesetze haben dabei ihren deutlichen Nachweis für verschiedene Stoffe gefunden, deren Partikelchen den Anforderungen des einen oder des anderen Gesetzes entsprechen. Aber auch zwei Vertreter jener Theilchengruppen, welche zwischen den ersteren beiden liegt, scheint Compan gefunden zu haben. Mit anisiertem Salzalkohol (alcool salé anisé) oder mit alkoholischer Seifentinctur hergestellte Emulsionen in Wasser gaben gleich nach Herstellung der Emulsionen, also im reinsten Stadium, das Zerstreuungsgesetz $\lambda^3 \log (I_0 - I'') = C''$, nach einem Stehenbleiben von einigen Stunden aber schon das gewöhnliche Reflexionsgesetz. Soll man dieses Gesetz der dritten Potenz in der That als das Zerstreuungsgesetz für Theilchen anerkennen, welche nahe einer Wellenlänge kommen, so müsste es eine theoretische Begründung erfahren, die zu geben wohl von besonderer Schwierigkeit sein dürfte.

Nach diesen Darlegungen will ich nur noch bemerken, dass im Rayleigh'schen Sinne nur die gegen eine Wellenlänge kleine Theilchen enthaltenden Medien, trübe Medien zu nennen sind und jede Beimengung größerer Theilchen als eine Verunreinigung zu betrachten ist. Die Richtigkeit des Rayleigh'schen Gesetzes für echte trübe Medien wurde mehrfach nachgewiesen: 1886 von Abney und Festing für Mastixemulsionen (Intensity of Radiation through turbid media. Proceed. R. Soc. Lond., vol. XL., p. 378); 1891 von A. Lampa ebenfalls für Mastixemulsionen (Über die Absorption des Lichtes in trüben Medien. Wien. Sitzb. Bd. 100, Abth. II a, p. 730); 1891 von A. Hurion für Citronensäure in Alkohol und Silberchlorure in Wasser (Transmission de la lumière à travers les milieux troubles. Compt. rend. tom. 112. p. 1431); zuletzt 1899 von Compan für Mastixemulsionen und Silberchlorure in Wasser (Transmission de la lumière par les milieux troubles. Compt. rend. tom. 128, p. 1226). In der letzten Arbeit haben wir auch die Aufklärung erhalten, warum K. Ångström bei seiner Untersuchung der festen trüben Medien von Magnesia, Ruß und Zinkoxyd (Beobachtungen über die Durchstrahlung von Wärme verschiedener Wellenlänge durch trübe Medien. Wied. Annal. Bd. 36, p. 715) nicht das Rayleigh'sche Gesetz fand, wie oben auseinandergesetzt wurde. Angström weist übrigens selbst auf den Einfluss der Größe der Theilchen hin.

Es ist nach allem Vorhergehenden selbstverständlich, dass die Messungen der Intensität der Farben im Himmelslichte sehr verschiedene Resultate geben mussten. Bei schön blauem Himmel werden größere Theilchen in geringer Menge vorhanden sein und das Rayleigh'sche Gesetz wird sich dann sehr nahe bewahrheiten. Dies war wohl der Fall bei den vorläufigen Messungen, welche Rayleigh in seiner grundlegenden Arbeit über die trüben Medien und das Himmelsblau (On light from the sky, its polarisation and colour. Phil. Magaz. Vol. 41. 1871. p. 107) mittheilt. Es ergibt sich auch aus der weiteren Arbeit Rayleigh's (Phil. Magaz. 1899 [5. ser.] vol. 47. p. 383), dass bei Berücksichtigung der Dispersion das Blau sogar stärker hervortreten muss. Ist das Blau mehr weniger weißlich, sind also viele größere Theilchen in der Luft vorhanden, so wird ein sehr wechselndes Verhalten sich zeigen, entsprechend den Veränderungen der Summe $\lambda^4 \log (I_0 - I) + \lambda^2 \log (I_0 - I')$, oder vielleicht gar der Summe der drei Posten $\lambda^4 \log (I_0 - I) + \lambda^3 \log (I_0 - I'') + \lambda^2 \log (I_0 - I')$. Daraus erklären sich die wechselnden Resultate der Messungen von Vogel (Monatsb. d. preuss. Ak. d. Wiss. 1880. p. 801) und von Crova (Compt. rend. tom. 109. p. 493 und tom. 112. p. 1176 und 1246).

Anmerkung 2. Rayleigh a. a. O. — Die Polarisation ist, auch theoretisch, nur für das einmal zerstreute (primär zerstreute) Licht total, und zwar nur dann, wenn die trübenden Theichen als Kügelchen angesehen werden können; erleidet das einmal zerstreute Licht von Theilchen, die es trifft, eine zweite, dritte, ... n-fache Zerstreuung (secundär zerstreutes Licht), so bleibt wohl — wie J. L. Soret in seiner ausgezeichneten Arbeit über diesen Gegenstand (Sur la polarisation atmosphérique. Archives des sciences de Genève. t. 20, 1888, p. 429. — Ursprünglich in Ann. d. Chim. et d. Phys. 6me série, t. 14, 1888) gezeigt hat — die Polarisationsebene und die Lage des Maximums dieselbe, die Totalität der Polarisation wird aber durch die eine Componente des secundär zerstreuten Lichtes unmöglich gemacht. In der Atmosphäre findet man schon aus diesem Grunde niemals total polarisiertes Himmelslicht. In seiner neuesten Arbeit über diesen Gegenstand hat Lord Rayleigh aufmerksam gemacht, dass auch die längliche statt kugelförmige Gestalt der Theilchen die Totalität der Polarisation zerstören würde. Dass auch das die Erdoberfläche treffende Sonnenlicht, durch seine Reflexion von der letzteren, die Größe der Polarisation des Himmelslichtes beeinflusst, ist a priori zu erwarten und wurde von Soret (Influence des surface d'eau sur la polarisation etc. Compt. rend. t. 107. p. 867) und von Mc Connel (Effect of snow on the polarization of the sky. Nature, 1887, vol. 37, p. 177, und On the polarization of skylight. Phil. Mag. 1889, vol. 27, p. 81) auch durch Beobachtungen nachgewiesen. Nimmt man dazu, dass viel von größeren Theilchen reflectiertes, meist nur theilweise und stets in einer ganz anderen Polarisationsebene polarisiertes Licht immer vorhanden sein wird, so begreift man leicht, dass die Werte, welche als Größe der Polarisation des Himmelslichtes gemessen werden, weit von der totalen Polarisation abstehen müssen und selbst bei günstigen atmosphärischen Verhältnissen recht beträchtlich unter der Totalität bleiben. Demgegenüber erklären sich hinwider die ziemlich hohen Werte der Polarisation in den gut blauen Emulsionen bei meinen Untersuchungen daraus, dass nicht nur jeder Einfluss des »Bodens« bei ihnen wegfällt, sondern dass auch die Menge des secundär zerstreuten Lichtes gegenüber dem primär zerstreuten dabei verhältnismäßig viel kleiner war als im Atmosphärenlicht.

Anmerkung 3. Die Hagenbach'sche Theorie des Himmelsblaus ist von drei Gesichtspunkten aus zu untersuchen. 1. kommt in Frage, ob durch die Reflexion an in ihrer Dichte immerhin nur leicht verschiedenen Luftpartien überhaupt die thatsächliche Helligkeit des zerstreuten Tageslichtes zu erklären ist; 2. ob durch die wiederholten Reflexionen an solcher verschieden dichter Luft ein so großes Übermaß an blauen Strahlen erzielt werden kann, dass daraus die blaue Farbe des Himmels sich ergeben könne; 3. ob die durch die Messungen festgestellten Verhältnisse der Polarisation des Himmelslichtes in dieser Theorie erklärbar sind.

Was zuerst die Helligkeit des Tageslichtes betrifft, so können wir zur Feststellung der Intensität der primären Reflexionen uns der Fresnel'schen Formel bedienen. Nach derselben ist die Intensität des einmal reflectierten Lichtes:

$$I_1^2 = I_0^2 \, {}^1\!/_2 \left[\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} + \frac{\operatorname{tng}^2(i-r)}{\operatorname{tng}^2(i+r)}\right],$$

worin i und r die gewöhnliche Bedeutung haben, also i der Einfalls-, r der Reflexionswinkel ist. Es hängt also die Intensität des reflectierten Lichtes von der Größe der Differenz $(i-r)$ ab. Diese Differenz ist aber für zwei Mittel, welche nahe gleiche Brechungsexponenten haben, wie dies bei den in der Luft vorkommenden Dichteunterschieden aneinander grenzender Luftpartien stets der Fall ist, immer sehr klein, so dass unter allen Umständen die obige Formel darstellbar ist durch $I_1^2 = \beta I_0^2$, wobei β ein sehr kleiner Bruch ist. Setzen wir noch $I_0 = 1$, so ist $I_1^2 = \beta$. Der Effect der folgenden n Reflexionen summiert sich allerdings zu der primären, soweit sie schließlich Licht in dieselbe Richtung schicken. Nehmen wir selbst an, dass von der Gesammtsumme aller Reflexionen stets nach allen Richtungen die Wirkung jeder einzelnen Reflexion sich summiere, so wird die Gesammtwirkung gegeben sein durch die Reihe:

$$I_s^2 = \beta + \beta^2 + \beta^3 \ldots\ldots\ldots \beta^n.$$

Um die Wirkung der secundären Reflexion gegenüber der primären abzuschätzen, zerlegen wir diese Summe in zwei Theile, von denen der erste nur die primäre Reflexion enthält und der zweite alle secundären zusammenfasst. Wir erhalten dann die Intensität des primär reflectierten Lichtes gleich β und als Summe der Intensitäten alles secundär reflectierten Lichtes

$$\beta^2 (1 + \beta + \beta^2 + \ldots\ldots\ldots \beta^{n-2})$$

für sehr große n wird dies gleich $\beta^2 \left(\frac{1}{1-\beta}\right)$.

und das ist jedenfalls kleiner als β, da eben β ein kleiner Bruch ist. Die secundären Reflexionen tragen also zur Helligkeit des Himmels alle zusammen nicht soviel bei, wie die primären, und letztere ergeben nur eine sehr geringe Intensität. Es scheint deshalb ausgeschlossen, dass durch die Reflexionen an Luftschlieren je die bedeutende Helligkeit des blauen Himmelslichtes erzielt werden kann.

Was den zweiten Punkt betrifft, so wird für das durch die zahllosen Schlieren durchgehende Licht der Ausdruck im Wesentlichen sein $I_1 = I_0 e^{-kh\lambda^{-2}}$; der Unterschied der Farben des durchgegangenen und folglich auch des reflectierten Lichtes wächst also umgekehrt wie das Quadrat der Wellenlänge. Das der Formel für echte Reflexionen, die wir auch wie in Anmerkung 1 schreiben können: $\lambda^2 \log (I_0 - I) = C$, entsprechende Überwiegen des Blau im genügend oft reflectierten Lichte, kann also nur den quadratischen Unterschieden der Wellenlängen proportional hervortreten, und das ist außerordentlich langsam, so dass bei den Reflexionsversuchen kaum der Stich ins Blaue dem Auge auffällt. Wir haben auch bei den »trüben Medien«, bei welchen sich die eben angeführte Formel bewahrheitet, keinen angenäherten Eindruck von Himmelsblau, während bei jenen echten trüben Medien, welche der Formel $\lambda^4 \log (I_0 - I) = C$ gehorchen, das schöne Blau eine der auffallendsten Erscheinungen ist.

Endlich bieten auch die thatsächlichen Polarisationsverhältnisse des Himmelslichtes für die Hagenbach'sche Reflexionstheorie kaum überwindliche Schwierigkeiten. Die erste Voraussetzung, die gemacht werden müsste, ist, dass die Luftschlieren stets ziemlich gleichmäßig nach allen Richtungen geneigte Reflexionsflächen liefern. Da aber die Entstehung der Luftschlieren entweder durch aufsteigende Strömchen oder durch horizontale Windströmungen in den unteren und oberen Schichten der Atmosphäre entstehen, so möchte man erwarten, dass auch die Schlierenflächen in diesen zwei ausgezeichneten Richtungen liegen werden, und besonders würde man die horizontale Richtung derselben infolge der Winde für vorherrschend ansehen müssen, während andere Neigungen um so seltener werden müssen, je mehr sie sich dem Winkel von 45° mit der Horizontalen nähern. Nun verlangt aber der Umstand, dass das Maximum der Polarisation, das ja in einem Sonnenabstande von 90° eintritt, gerade zur Zeit, wo die Sonne niedrig ist, also morgens und abends, die größten Werte aufweist, dass zu dieser Zeit im Zenithe die Neigung von 45° vorherrscht; das ist im höchsten Grade unwahrscheinlich. Ebenso unwahrscheinlich ist es, dass diese Neigung tagsüber dem Sonnenstande folgt, so dass das Maximum der Polarisation stets in 90° Sonnenabstand im Vertical der Sonne auftrete, wie es thatsächlich der Fall ist. Man kann hiefür jedenfalls in keinem Falle eine causa sufficiens angeben und müsste sich daher auf die naturwissenschaftlich nicht acceptable Phrase zurückziehen: es könnte doch möglicherweise der Fall sein. Diese Phrase ist umso unannehmbarer, als wir eine streng wissenschaftliche und von jeder weiteren willkürlichen Hypothese freie Grundlage für die volle Erklärung der Thatsachen in Rayleigh's Theorie besitzen.

Eine weitere Schwierigkeit bieten die in Hagenbach's Theorie ja auch wesentlichen vielfachen secundären Reflexionen. Bei Polarisation durch Reflexion wird ein total polarisierter Strahl, wenn er auf eine gegen die erste Reflexionsebene um 90° gedrehte Ebene fällt, vollständig ausgelöscht. Wenn man mit der Hagenbach'schen Theorie sein Auslangen finden will, muss man in erster Linie mit Neigungen der Schlierenebene rechnen, welche nach allen Richtungen gleichmäßig vertheilt sind; thut man das nicht, so kommt man eben auf die oben durchgeführten unüberwindlichen Schwierigkeiten. Sind aber alle Neigungen gleichmäßig vertreten, so muss der größte Theil der bei der erstmaligen Reflexion polarisierter Strahlen durch Auffallen auf um 90° gedrehte Schlierenebenen

wieder ausgelöscht werden. Es ist schwer zu ermitteln, wie da noch eine nennenswerte Lichtmenge überhaupt, noch schwerer aber, wie eine den thatsächlichen Messungen entsprechende polarisierte Lichtmenge vom Himmel geliefert werden kann, und man kommt so neuerlich auf die im ersten Punkte aufgeworfene Hauptschwierigkeit dieser Theorie zurück.

Für jede physikalische Theorie ist es ein bedenklicher Fall, wenn sie für jede besondere Erscheinung eine neue Hypothese machen muss. Unter der Voraussetzung, dass das Himmelslicht den Reflexionen an Luftschlieren zu verdanken ist, muss man aber nicht nur für die erwähnten Grunderscheinungen schon zu besonderen Hypothesen greifen — und darin liegt das Bedenklichste der Theorie —, sondern man müsste noch für alle im Laufe dieser vorliegenden Untersuchungen festgestellten Thatsachen immer wieder zu außerhalb den Grundlagen dieser Theorie liegenden Hypothesen greifen, während man in Rayleigh's Theorie sein Auslangen findet mit den von vorneherein klaren Principien reiner und »verunreinigter« trüber Medien.

Hiernach kann es nicht zweifelhaft sein, dass auch die Hagenbach'sche Theorie des Himmelsblaus, die auf den ersten Blick gute physikalische Grundlagen bietet, nicht genügt, um den Thatsachen in physikalisch exacter Weise gerecht zu werden.

Anmerkung 4. Das Cornu'sche Photopolarimeter wurde von Cornu zuerst 1882 auf dem Congresse der Association française pour l'avancement des sciences in La Rochelle beschrieben und seine Handhabung und Angaben erklärt. Auf dem Congresse derselben Association in Limoges 1890 gab er dann die Beschreibung der vollen Montierung desselben für die Messungen der Polarisation des Himmelslichtes. Man findet diese beiden Beschreibungen in den Congressberichten der Association française für 1882 und 1890. (Mir liegen zwei Sonderabdrücke vor, die ich der Güte des Herrn Cornu verdanke; 1890 ist als Verlagsort angegeben: Paris, au secretariat de l'Association, Hôtel des sociétés savantes, 28, Rue serpente 28.) Da ich sonst nirgends eine Beschreibung dieses vorzüglichen Instrumentes gefunden habe, gebe ich dieselbe hier kurz. Ein doppelbrechender Wollaston ist an einem Ende einer Röhre befestigt, welche einen Theilkreis trägt, und als Ganzes sammt dem Wollaston, dem Theilkreis und dem ganzen übrigen Instrumente um ihre Axe drehbar ist; deren Drehungen werden mit Hilfe einer fixen Marke am Theilkreise gemessen. Am rückwärtigen Ende dieser Röhre ist die den Nicol enthaltende, ebenfalls mit einem Theilkreise versehene Röhre um ihre Axe drehbar eingesetzt; am vorderen Ende ist eine etwa 15 *cm* lange Röhre, welche vorne ein Diaphragma mit quadratischer Öffnung trägt, fest angebracht, damit sicher alles seitliche Licht vom Wollaston abgehalten sei. Das ganze Instrument wird dann noch auf Höhe und Azimuth einstellbar montiert.

Die Messung wird so vorgenommen, dass man bei gekreuzter Nicolstellung zuerst durch Drehung des ganzen Instrumentes die Gleichheit der beiden Bilder der quadratischen Öffnung herstellt; man hat dann das ganze Instrument einfach um 45° zu drehen, um zu bewirken, dass die Polarisationsebene mit dem Hauptschnitte des Wollaston zusammenfalle. Hat man die Polarisationsebene, so stellt man nun die Gleichheit der beiden Bilder durch Drehung des Nicols her und erhält so den Winkel ω. Die Polarisation ist dann gegeben durch $\cos 2\,\omega$, wie ohne Schwierigkeit zu erkennen ist. Der Wollaston liefert nämlich die beiden senkrecht aufeinander polarisierten Strahlen von der Intensität P^2 und Q^2; die Polarisation des einfallenden Lichtes ist dann gemessen durch $R = \frac{P^2 - Q^2}{P^2 + Q^2}$. Bei der durch den Nicol bewirkten Gleichheit der Bilder beim Winkel ω ergibt sich: $p^2 = P^2 \cos^2\omega$ und $q^2 = Q^2 \sin^2\omega$. Dies in die Gleichung für R eingesetzt, gibt $\cos 2\,\omega$.

Es liegt nun aber eine Unsicherheit darin, dass man nicht mit Exactheit weiß, ob der Nullpunkt des Nicol genau in der Polarisationsebene, bezw. in der darauf senkrechten Ebene liegt. Um diese Fehlerquelle zu eliminieren weist Cornu folgenden Weg. Man beobachtet in zwei um 90° Drehung verschiedenen Lagen des Instrumentes, nämlich nach Einstellung desselben in die Polarisationsebene des einfallenden Lichtes und dann nach Drehung des ganzen Instrumentes um 90°. Die erstere Ablesung am Nicol wollen wir ω_1, die zweite ω_2 nennen. Sei die unbekannte Abweichung des Nullpunktes des Instrumentes von der eigentlichen Nulllage ω_0, so ist das einemal $\omega = \omega_1 - \omega_0$, das zweitemal aber $\omega = 90 - (\omega_2 - \omega_0)$ und daher $2\,\omega = 90 - (\omega_2 - \omega_1)$. Da nun die Polarisation R gemessen wird durch $\cos 2\,\omega$, so haben wir

$$R = \cos 2\,\omega = \cos\,[90 - (\omega_2 - \omega_1)] = \sin\,(\omega_2 - \omega_1).$$

Darauf beruht nun die Methode der Beobachtung und der Berechnung der Polarisation bei Anwendung des Cornu'schen Photopolarimeters.

Bei den vorliegenden Untersuchungen wurden stets ω_1 und ω_2 für jede Beobachtung mehrmals eingestellt und das Mittel als Wert der Winkel ω_1 und ω_2 genommen. Die Beobachtungen wurden folgendermaßen durchgeführt. Die Einstellung der Gleichheit der Bilder, also die eigentliche Beobachtung machte immer ich. Ich hüllte meinen Kopf bis über die Ocularöffnung beim Nicol während der Beobachtungen stets mit einem doppelten schwarzen Tuche ein, so dass ich während der ganzen Beobachtungsreihe nie ein fremdes Licht sah und mein Auge dauernd an die Dunkelheit accomodiert blieb. Die Ablesung der Theilkreise besorgte Adjunct J. Valentin auf den Anruf »Ablesen«. Bei einer sehr großen Anzahl von Beobachtungen hatte Herr Dr. Hatschek die Güte, die vom Herrn Valentin dictierten Ablesungen in das Beobachtungsschema einzutragen. Bei den Beobachtungen im Laboratorium war der Raum dunkel gemacht und nur zur Ablesung jedesmal eine kleine elektrische Glühlampe entzündet. Bei den Beobachtungen der Polarisation des Himmelslichtes besorgte Herr Valentin die Ablesung der Theilkreise und Aufschreibung, und der Mechaniker der k. k. Centralanstalt, Herr Sündermann, das Vorsetzen der passend gefassten farbigen Gläser. Die letzteren Beobachtungen wurden auf der Plattform des Thurmes der k. k. Centralanstalt gemacht, die übrigen Untersuchungen konnten nicht im Laboratorium der

k. k. Centralanstalt durchgeführt werden, da bislang auf der Hohen Warte kein elektrischer Strom zu haben ist. Professor Franz Exner hatte die große Freundlichkeit, mir in den Osterferien und dann in den großen Ferien und wieder in den Weihnachtsferien sein Cabinet zu diesen Versuchen zur Verfügung zu stellen, wofür ich ihm den besten Dank ausspreche.

Anmerkung 5. Chr. Jensen, Beiträge zur Photometrie des Himmels. Inaugural-Dissertation. Kiel 1888. Es ist wohl überflüssig, hier die ganze Literatur über die Polarisation des Himmelslichtes beizubringen; man findet dieselbe recht gut zusammengestellt in der eben citierten Abhandlung von Jensen. Nur die große Arbeit von Rubenson sei hier speciell angeführt, in welcher alle älteren hierher gehörigen Arbeiten sich angegeben finden: Mémoire sur la polarisation de la lumière atmosphérique. Par Dr. R. Rubenson. Upsal. C. A. Lefler. 1864.

Anmerkung 6. Bei der Bearbeitung meiner Versuchsreihen habe ich Kenntnis von der sehr interessanten Abhandlung von A. Bock in Wiedemann's Annalen, Bd. 68, 1899, erhalten. Aus derselben ersehe ich, dass auch Sohncke über das interessante Phänomen, das Tyndall das »residue blue« nennt, sich im Wesentlichen der von mir oben gegebenen Erklärung für die größte Polarisation im Roth schon bediente. Tyndall gebührt neben Brücke in der Erklärung der blauen Farbe des Himmels und der Polarisation des Himmelslichtes durch die Erscheinungen der trüben Medien ohne allen Zweifel der Ruhm des Pionniers, und seine Arbeiten auf diesem Gebiete sind vielleicht zu wenig gewürdigt und gelesen. Es ist hier nicht der Platz, darauf näher einzugehen, sie seien nur den Titeln nach angeführt; es wird sich mir anderswo Gelegenheit bieten, dieselben eingehend zu würdigen. Die hierher gehörigen Abhandlungen Tyndall's sind: On a news series of chemical reactions produced by light; — On the blue colour of the sky, tke polarization of sky light, and on the polarization of light hy claudy matter generally; — Note on the formation and phenomena of clouds. — Proceedings of the Royal Society. London. Vol. 17. 1868, 1869, p. 92, 222, 317.

Das Tyndall'sche »residue blue« besteht darin, dass bei Dampfwolken, wenn die Wolkenelemente schon derart sind, dass die ganze Wolke im seitlichen Lichte nicht mehr blau, sondern stark weißlich erscheint, die polariscopische Untersuchung die langwelligen Farben noch polarisiert erweisen, das Blau aber unpolarisiert ist. (Proceedings of the Royal Soc. London l. c., p. 226.) Tyndall macht dazu die Anmerkung: This seems to prove that particles too large to polarize the blue, polarize perfecttly light of lower refrangibility. Dies ist aber im Wesentlichen dasselbe, was Sohncke sagt und läuft zu allerletzt auch auf die von mir oben gegebene Erklärung für die Erscheinung hinaus, dass bei weißlichen Tönen der trüben Medien das Licht im Roth am stärksten und in den anderen Farben umsoweniger polarisiert ist, je kurzwelliger sie sind.

Bock's hiehergehörige Experimente sind nun sehr interessant; die Abhandlung trägt den Titel »Der blaue Dampfstrahl«. Er erhält das »trübe Medium« im Dampfstrahle, der mit Salzsäure »-Staub« beschickt wird. Je kräftiger der zerstäubende Luftstrom, desto schöneres Blau liefert der Dampfstrahl. Die Messungen waren directe Intensitätsmessungen und polarimetrische. Die ersteren ergaben für den blauen Dampfstrahl die Richtigkeit des Rayleigh'schen Gesetzes und wichen von letzterem bei weißglänzendem Dampfstrahle ab — wie es die Theorie verlangt. Die polarimetrischen, bezw. polariscopischen Messungen beschränkte Bock auf den weißglänzenden Dampfstrahl, und dabei ergab sich ihm dieselbe Erscheinung des »residue blue«, welche schon Tyndall bei stark weißlichen Wolken erhalten hatte und auf welche Bock mit Recht die von Sohncke im Sinne der Rayleigh'schen Theorie verdeutlichte Tyndall'sche Erklärung anwendet. Bock verschaffte sich aber über die Größe der in diesem Dampfstrahle vorhandenen Theilchen durch Messung der Beugungsringe, die sie im durchgehenden Lichte erzeugen, Aufschluss. Er fand die Durchmesser dieser Theilchen im rothen Lichte zu 0·92 Mikron, im blauen Lichte zu 0·88 Mikron, im Mittel also zu 0·9 Mikron, somit größer als die Wellenlänge des rothen Lichtes. Dies war zu erwarten, sobald Beugungsringe auftreten, da bei Theilchen, welche kleiner sind als eine Lichtwellenlänge, die gewöhnlichen Gesetze der Beugung ebensowenig bestehen, wie die der Reflexion und Brechung. An ihre Stelle treten dann die von Stokes (On the Dynamical theorie of diffraction Mathemat. u. Physic. Tapers. vol. II. p. 243) allgemein für störende Kräfte und von Lord Rayleigh in der oft schon citierten Abhandlung, für Theilchen, welche gegen eine Wellenlänge klein sind, entwickelten Gesetze.

Dies vorausgeschickt, wird sich nun leicht zeigen lassen, dass die aus Bock's Versuchen sich ergebenden Folgerungen, mit den aus meinen Versuchen gezogenen, in der Rayleigh'schen Theorie sich vereinbaren lassen. Der Hauptunterschied der Beobachtungsresultate liegt darin, dass bei Dampfwolken sowohl Tyndall als Bock finden, dass bei weißlichen Tönen der Wolken ein Zustand eintritt, wo senkrecht auf den directen Strahl das Blau überhaupt unpolarisiert ist, während ich bei trüben Medien, wenn sie weißlich und stark weißlich wurden, noch alle Farben, auch das Blau und Violett, in der Senkrechten auf den directen Strahl polarisiert fand, wenn auch umso weniger, je kurzwelliger die Farben sind. Nach den Folgerungen aus Rayleigh's Theorie, welche ich im Texte dargelegt, will das besagen, dass die Elemente der Wolken viel gleichartiger bleiben in Bezug auf ihre Größe als dies in anderen trüben Medien der Fall ist. Sind die Theilchen der Wolke aber gleichartig und dabei nur für die langwelligeren Farben noch klein gegen eine Wellenlänge, so folgt daraus sofort, dass die den trüben Medien eigene Polarisation im Blau nicht mehr vorhanden sein kann. In den trüben Medien sind aber offenbar stets Theilchen aller Größenverhältnisse vorhanden, und so werden selbst dann, wenn bei weitem die Mehrzahl der Theilchen nur mehr für die langwelligen Farben klein ist, immer noch eine Anzahl auch für die kurzwelligen Farben kleine Theilchen vorhanden sein, und so wird die specifische Polarisation für die kurzwelligen Strahlen zwar gering, aber immerhin messbar sein

Der Beitrag, welchen Bock in seiner Arbeit zur Kenntnis der Größe jener Theilchen liefert, welche noch nach dem gewöhnlichen Gesetze der Beugung, daher wohl auch der Reflexion und Brechung, wirken, ist wohl das interessanteste Ergebnis seiner Untersuchungen; man fühlt sich stark versucht, an einen Beobachtungsfehler zu denken. Allein es ist gewiss nicht erlaubt, dies ohneweiters anzunehmen. Sind aber Bock's Messungen der Beugungsringe richtig, so folgt daraus, dass die Flächenausdehnung für Reflexion, Brechung und Beugung, nicht, wie auf Grund der Ableitung der betreffenden Gesetze stets gesagt wird, eine so große sein muss, dass sie eine große Anzahl von Wellenlängen ausmisst, sondern, dass selbst ein die Wellenlänge wenig übertreffender Durchmesser Beugungsringe erzeugen kann. Der Halbkreis eines solchen Theilchens, das nun doch sicherlich auch den Reflexionsgesetzen genügen wird, hat eine Ausdehnung, nicht von einem mehrfachen Vielfachen einer Wellenlänge, sondern nur von 2 bis 4 Wellenlängen, je nachdem man violettes oder rothes Licht anwendet. Die Theilchen, welche Bock durch Beugungsringe gemessen, können aber unmöglich das Maximum der Polarisation senkrecht auf den Strahl erzeugt haben, dasselbe muss jedenfalls von gleichzeitig vorhandenen, viel kleineren Theilchen, welche keine Beugungsringe mehr hervorrufen, verursacht worden sein.

Anmerkung 7. Lallemand, Sur la polarisation et la fluorescence de l'atmosphère; Compt. rend. 1872, tom. 75, p. 707. Lallemand hat die 1871 erschienene, oft citierte Abhandlung Rayleigh's im Phil. Magaz. offenbar nicht gekannt, als er diese Notiz schrieb. Darnach kommt er zu dem Schlusse, dass es die Molecule der Luft seien, welche die Lichtzerstreuung in der Atmosphäre bewirken, und führt darauf — freilich nicht in der theoretisch richtigen Weise — die eigenartigen Polarisationsverhältnisse des Himmelslichtes zurück. In der Nichterkenntnis der eigentlichen Ursache der atmosphärischen Polarisation lag es nun, dass er, der doch schon nahe an die wahren Ursachen herangerückt war, die blaue Farbe des Himmels nicht aus den gleichen Principien erklären konnte wie die Polarisation, sondern hiefür in der Fluorescenz der Luft die Erklärung suchte. Diese eigenartige Erklärung stützte 1889 Hartley (Nature, 1889, vol. 39, p. 477) durch Hinweis auf die Eigenschaft des Ozon, die kurzwelligsten Strahlen zu absorbieren, und so müsse eine Blau-Fluorescenz in der Luft entstehen. Das schwächliche Fluorescenzlicht mit dem unbestimmten eigenartigen Schimmer kann aber unmöglich das herrliche, leuchtende Himmelsblau hervorbringen.

Anmerkung 8. Während meiner Vorbereitungen für die vorliegenden Untersuchungen erschien in »Ciel et terre« vom 16. Februar 1899 ein Artikel vom Präsidenten der belgischen Akademie der Wissenschaften, W. Spring, welcher die schon ziemlich allgemein gewordene Auffassung, dass das Himmelsblau das Blau trüber Medien im seitlichen Lichte sei, durch einen neuen Versuch zu bekämpfen unternahm und die blaue Eigenfarbe des Sauerstoffes, bezw. der Luft, als Ursache der blauen Farbe des Himmels darzuthun versuchte. Der große Name, welchen sich Herr Spring durch seine bedeutenden und vielseitigen Arbeiten erworben sowie die Form der Publication, in dem Herr Spring als Präsident der belgischen Akademie der Wissenschaften ausdrücklich bezeichnet war, ließen in mir die Befürchtung aufkommen, dass hier in eine rein sachliche, objectiv-wissentschaftliche Frage, das autoritative Moment entscheidend einfließen könnte. Das Ergebnis des neuen Versuches schien mir im Lichte der Rayleigh'schen Theorie selbstverständlich und eher für als gegen dieselbe zu sprechen. Ich hatte eben die vorliegenden Untersuchungen unternommen unter dem Gesichtspunkte, dass die Rayleigh'sche Theorie für tadellose trübe Medien für alle Farben die gleiche Polarisation verlangt, und ich war gerade daran, durch die experimentelle Untersuchung klarzustellen, ob diese Forderung der Theorie sich bewahrheite. Man kann sich daher mein Erstaunen vorstellen, als ich in Spring's Artikel den Standpunkt vertreten fand, dass nach der Rayleigh'schen Theorie nur das Blau polarisiert sein dürfe, und erfuhr, dass er, weil bei »Auslöschung« des Blau durch Vorschaltung einer entsprechend gelben Flüssigkeit die Polarisation so gut wie unverändert sich ergebe, erklärte, dieser Versuch widerlege die Rayleigh'sche Theorie — wo dieses Resultat ja gerade eine Forderung dieser Theorie war. Ich habe daher sofort den Versuch Spring's nicht nur für das Himmelslicht, sondern auch für trübe Medien wiederholt, und es zeigte sich, dass derselbe bei zweifellos trüben Medien — wie die Theorie es verlangte — zu demselben Ergebnisse führte wie beim blauen Himmel. Ich gieng einen Schritt weiter und untersuchte das Verhalten der Polarisation in den einzelnen Farben, Roth, Grün und Blau, mit und ohne Vorschaltung der gelben Flüssigkeit. Es ergab sich eine volle Übereinstimmung bei den trüben Medien und dem Himmelslichte. Ich hielt dafür, dass es angezeigt sei, diese Versuche sofort zu veröffentlichen, da die große Autorität Spring's möglicherweise in manchen Kreisen seine Auslegung des eigentlich für die Rayleigh'sche Theorie sprechenden Versuches als gegen dieselbe entscheidend erscheinen lassen konnte. Dies habe ich denn in einer vorläufigen Mittheilung im Anzeiger unserer Akademie der Wissenschaften in Wien vom 4. Mai 1899 gethan. (Jahrgang 1899, Nr. XII, p. 163.) Die Notiz rief eine Polemik zwischen Spring und mir hervor, welche in »Ciel et terre« 1899 abgeführt wurde (20. année, p. 177; p. 301; p. 305). Ich habe auf die letzten Bemerkungen Spring's nicht mehr reagiert; da ich sah, dass Spring die Sache persönlich nimmt, habe ich geschwiegen; persönliche Empfindlichkeiten gehen die Wissenschaft nichts an. Ich will nur hier Herrn Spring nochmals versichern, dass er sich täuscht, wenn er glaubt, dass der Ausdruck »gewaltiges Missverständnis« mehr bedeute als ein großes, meinetwegen ein sehr großes Missverständnis. Wir sagen ja doch auch »gewaltig schön«, »gewaltige Intelligenz«, »gewaltig erfrischt« u. s. w. Es thut mir sehr leid, dass Herr Spring mir das »gewaltige Missverständnis« so schlecht ausgelegt hat, und ich bedauere, dass ich einem Nichtdeutschen gegenüber einen Ausdruck angewandt habe, den er schief nehmen konnte. In der Sache selbst kann ich aber keinen Schritt zurück thun; Spring hat thatsächlich die Rayleigh'sche Theorie falsch interpretiert, und die Versuche, welche er gegen dieselbe gemacht zu haben glaubte, zeugen wirklich für dieselbe. Obwohl schon die Polemik in »Ciel et terre« hierin volle Klarheit gebracht hat, halte ich mich doch verpflichtet, hier die Beobachtungsergebnisse mit und ohne Vorschaltung der von Spring angewandten Flüssigkeit mitzutheilen.

Spring argumentierte: »Sieht man die Polarisation als das Kriterium für die Entstehung des Himmelsblaus durch Reflexion an« (Spring's Missverständnis der Rayleigh'schen Theorie liegt zum großen Theile darin, dass er derselben, die jede eigentliche Reflexion ausschließt, zuschreibt, sie erkläre das Himmelsblau aus der Reflexion), »so muss man nothgedrungen zugeben, dass man den polarisierten Theil des Himmelslichtes auslöschen müsse, wenn man mit Hilfe einer in der Farbe complementären Substanz die blauen Strahlen auslöscht«. Wer Rayleigh's Theorie richtig verstanden hat, sieht sofort das Irrige dieser Argumentation. Es ist daher selbstverständlich, dass der auf dieser falschen Voraussetzung aufgebaute Versuch in den Augen Spring's gegen Rayleigh's Theorie entschied. Spring stellte sich eine Mischung von einer zehnprocentigen Schwefelcyankali- und einer fünfprocentigen Eisenchloridlösung her und verdünnte dieselbe so, dass sie gerade jenen gelben Ton erhielt, welcher erforderlich war, das jeweilige Blau des Himmels zu paralysieren, derart, dass der Himmel durch dieselbe »weiß« erschien. Ich habe diese Mischung mir ebenfalls in allen Stufen hergestellt und Spring's Versuch wiederholt. Er hatte und musste nach Rayleigh's Theorie Recht haben; die Polarisation des Gesammtlichtes des Himmels ändert sich durch die Vorschaltung dieser Flüssigkeit nicht oder nur wenig. Dasselbe Resultat ergibt aber auch die Anwendung dieses Vorganges bei den zweifellos trüben Medien, wie folgende Messungen der Polarisation mit dem Cornu'schen Photopolarimeter (Spring benützte das Savart'sche Polariscop) zeigen:

Weißes Sonnenlicht.

Trübes Medium: Martix-Emulsion.

		Polarisation:
20. März 1899	ohne Vorschaltung der Spring'schen Flüssigkeit:	0·7727,
	mit „ „ „ „	0·7859.

Elektrische Lampe, weißes Licht.

20. März 1899	ohne Vorschaltung der Spring'schen Flüssigkeit:	0·8348,
	mit „ „ „ „	0·8221.
22. März 1899	ohne Vorschaltung der Spring'schen Flüssigkeit:	0·8387,
	mit „ „ „ „	0·8090.
4. April 1899	ohne Vorschaltung der Spring'schen Flüssigkeit:	0·8406,
	mit „ „ „ „	0·8590.

Einzelne Farben im Sonnenlichte.

I. 18. März 1899.

	Roth	Gelb	Grün	Blau	Violett
Ohne Vorschaltung	0·8599	0·9150	0·8949	0·8625	0·7649
Mit »	0·8434	0·9121	0·9157	0·8508	0·7513

II. 20. März 1899.

	Roth	Gelb	Grün	Blau	Violett
Ohne Vorschaltung	—	0·8957	0·8796	0·8406	0·6018
Mit „	—	0·8971	0·8490	0·8211	0·5060

Einzelne Farben im elektrischen Lichte.

I. 20. März 1899.

	Roth	Orange	Grün	Blau
Ohne Vorschaltung	0·5135	0·7738	0·8080	0·6838
Mit „	0·5730	0·8121	0·8241	0·5534

II. 22. März 1899.

	Orange	Grün	Blaugrün	Blau	Violett
Ohne Vorschaltung	0·8572	0·8471	0·7923	0·7181	0·6534
Mit „	0·8686	0·8425	0·7060	0·6691	0·5948

III. 4. April 1899.

	Roth	Gelb	Grün	Blau	Violett
Ohne Vorschaltung	0·5461	0·8007	0·8028	0·6972	0·3891
Mit „	0·5835	0·7793	0·8151	0·4924	0·1925

Die angewendeten trüben Medien waren Mastixemulsionen, die nur nach dem Auge auf ein mehr minder gutes Blau hergestellt waren, dem des jeweiligen Himmels möglichst entsprechend. Die Spring'sche Flüssigkeit wurde stets am Himmel und am trüben Medium auf Auslöschung des Blauüberschusses geaicht. Die Resultate der Versuche an den trüben Medien beweisen auf das entschiedenste, dass sich die trüben Medien gegenüber der Vorschaltung der Spring'schen Flüssigkeit gerade so verhalten, wie das Himmelslicht, u. zw. nicht nur — wie Spring zuerst vom Himmelslichte erklärte — gegenüber dem Gesammtlichte, sondern auch gegenüber den einzelnen Farben, wie aus der schon im Anzeiger (l. c.) mitgetheilten Versuchsreihe hervorgeht, die hier nochmals angeführt sei:

I. Himmelslicht. 4. April 1899.

	Zwei rothe Gläser	Drei grüne Gläser	Drei blaue Gläser
Ohne Vorschaltung der Flüssigkeit	0·3239	0·4019	0·3665
Mit » „ „	0·2957	0·4210	0·2924

II. Trübes Medium. Elektrisches Licht.

	Roth	Grün	Blau
Ohne Vorschaltung der Flüssigkeit	0·7108	0·8070	0·6833
Mit „ „ „	0·6574	0·8131	0·5534

Diese Frage ist somit vollständig erledigt.